



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH A VÝROBA MODELU PROTOTYPU BRZDOVÉHO SEGMENTU VYSOKÉHO KOLA NA 3D FDM TISKÁRNĚ

DESIGN AND PRODUCTION OF THE PROTOTYPE BRAKE PAD FOR HIGH
BICYCLE WITH FDM 3D PRINTER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Milan Hložek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Milan Hložek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Oskar Zemčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh a výroba modelu prototypu brzdového segmentu vysokého kola na 3D FDM tiskárně

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce obsahuje řešeršší část zadané problematiky. Návrh více variant brzdového segmentu vysokého kola, Vytvoření jeho 3d modelu a základní pevnostní výpočty. Rovněž bude na 3D tiskárně vyroben model brzdového segmentu a provedeno technické a ekonomické zhodnocení.

Cíle bakalářské práce:

- řešerše zvolené problematiky
- návrh variant brzdového segmentu
- výroba brzdových segmentů
- technicko-ekonomické zhodnocení

Seznam literatury:

GEBHARDT, Andreas. Understanding additive manufacturing: rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing. Munich: Hanser, c2012, ix, 164 s. ISBN 978-1-56990-507-4.

FOŘT, Petr a Jaroslav KLETEČKA. Autodesk Inventor. Brno: Computer Press, 2007, 296 s. ISBN 978-80-251-1773-6.

CHANG, Tien-Chien, Richard WYSK a Hsu-Pin WANG. Computer-Aided Manufacturing. 3. vyd. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 684 s. ISBN 0-13-142919-1.

CHUA, C.K., K.F. LEONG a C.S. LIM. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3. vyd. Singapore: World Scientific Publishing Co., 2010, 512 s. ISBN 978-981-277-897-0.

SLOTA, Ján, Martin MANTIČ a Ivan GAJDOŠ. Rapid Prototyping a Reverse Engineering v strojárstve.
Vyd. 1. Košice: Strojnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, 2010, 207 s. ISBN
978-80-553-0548-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 20. 11. 2015





prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Tématem této bakalářské práce je návrh a řešení problematiky výroby brzdného segmentu historického kola v několika variantách technologií Fused Deposition Modeling. První část práce je věnována základnímu principu metody rapid prototyping a technologii FDM, materiálům používaných pro 3D tisk a historii vysokých kol. Druhá část práce se věnuje návrhu 3D modelu v programu Autodesk Inventor Professional 2016, procesu výroby brzdných segmentů a nakonec technicko-ekonomickému zhodnocení.

Klíčová slova

Rapid prototyping, Fused Deposition Modeling, materiály 3D tisku, vysoké historické kolo, brzdný segment vysokého kola, 3D tisk

ABSTRACT

The theme of this bachelor thesis is design and production of the prototype brake pad for high bicycle with FDM 3D printer. The first part is devoted to the basic principle of Rapid Prototyping and FDM technology, materials used for 3D printing and a history of high bicycles. The second part is dedicated to design a 3D model in Autodesk Inventor Professional 2016, the manufacturing process of brake segments and eventually technological-economic evaluation.

Key words

Rapid prototyping, Fused Deposition Modeling, materials for 3D printing, high bicycle, brake pad for high bicycle, 3D printing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HLOŽEK, M. *Návrh a výroba modelu prototypu brzdového segmentu vysokého kola na 3D FDM tiskárně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 58 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Návrh a výroba modelu prototypu brzdového segmentu vysokého kola** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Hložek Milan

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce, kterým byl Ing. Oskar Zemčík, Ph.D., za cenné připomínky a rady poskytnuté v průběhu jejího vypracování a především za čas strávený na konzultacích.

Dále bych chtěl poděkovat všem zaměstnancům firmy MCAE, zvláště panu Ing. Liboru Čechovi, kteří mi byli ochotni věnovat svůj čas. V neposlední řadě panu Zdeňkovi Měsíčkovi za zapůjčení brzdného segmentu a zasvěcení do tematiky a výroby vysokých historických kol.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING	10
1.1 Vymezení pojmu rapid prototyping	10
1.2 Princip metody	11
1.3 Rozdělení metod rapid prototyping.....	13
1.4 Metoda Fused Deposition Modeling.....	13
1.5 Ukázky 3D FDM tiskáren	15
1.6 Materiály používané pro výrobu součástí metodou FDM.....	17
2 VYSOKÁ HISTORICKÁ KOLA	20
2.1 Historie a vývoj jízdního kola	20
2.2 Historie a vývoj jízdního kola v Čechách	23
2.3 Brzdný segment vysokého historického kola.....	23
3 NÁVRH MODELU	25
3.1 Autodesk Inventor.....	25
3.2 Návrh konstrukce	25
3.3.1 První varianta – Varianta 1a	28
3.3.2 Varianta 1b.....	31
3.4 Druhá varianta.....	33
3.5 Třetí varianta	36
4 VÝROBA DANÝCH SOUČÁSTÍ NA 3D TISKÁRNĚ	39
4.1 Program Magics16	39
4.2 Program CatalystEX.....	41
4.3 Výroba metodou FDM	44
4.4 Post-procesing	45
4.5 Montáž brzdných segmentů	47
5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	49
5.1 Současný stav výroby součásti obráběním.....	49
5.2 Výpočet nákladů pro metodu 3D FDM tisku	50
5.3 Výroba součásti odléváním do silikonových forem.....	51
5.4 Porovnání metod pro kusovou výrobu	52

ZÁVĚR	55
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	56
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	57

ÚVOD

Při řešení námětu mé bakalářské práce jsem spolupracoval s několika společnostmi - firma Měsíček, zámečnictví Svitálek, MCAE a v neposlední řadě s ústavem strojírenské technologie VUT.

Firma Měsíček se zabývá již 25 let výrobou historických kol. Má ve svém výrobním programu několik modelů, které jsou distribuovány po celém světě, především – Německo, Francie, ale i ČR. Jejich produkce je prezentována na řadě světových výstav a cyklistických soutěžích a tak se těší stále větší oblibě. Náročná klientela si žádá různé specifitější modifikace, proto v současné době mnohdy již běžný standartní model kola není dostačující a tak dochází při konzultaci s obchodním klientem ke schvalování prakticky všech částí konstrukce kola i jeho dílčích prvků. Jednou z řady těchto prvků bývá také návrh řešení tvaru brzdícího segmentu – ruční brzda, která může mít několik variant a tyto jsou předmětem mé bakalářské práce.

Při tomto procesu je ve velké míře využívána 3D technologie, která je velmi rychlá a variabilní, čímž se výrazně zkrátila doba od konstrukčního návrhu po konečnou realizaci daného prvku – v tomto případě brzdícího segmentu. V konečném výsledku zcela postačuje k ověření funkčnosti a rovněž estetického tvaru vyráběného dílce. Při vlastním schvalovacím procesu mezi výrobcem a obchodním klientem dochází k viditelným úsporám jak času, tak také nemůžeme pominout úsporu finančních nákladů, které vykazovaly v minulosti používané klasické metody strojírenské výroby. Při řešení 3D technologie jsem spolupracoval s firmou MCAE, sídlící v Brně Kuřim, kde jsem se podílel na vlastním tisku daných dílů.

Cílem 3D technologie je navržení tvaru brzdového segmentu a poté je proveden 3D tisk tohoto dílce a dále může pokračovat kompletace historického kola a schvalovací proces s obchodním klientem. Je-li vše odsouhlaseno, může být zahájena výroba daného dílu.

Na strojírenské výrobě těchto dílů se podílí firma Měsíček ve vlastní režii, nebo někdy také spolupracuje se strojírenskou výrobou Svitálek, jež má ve svém strojním parku celou řadu specializovaných automatů.

1 TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

Rozvoj 3D modelování sebou přináší vznik nových technologií. Jednou z navazujících technologií je i rapid prototyping, který se zabývá stavbou fyzických prototypových součástí nebo sestav. Zdrojem dat pro rapid prototyping je virtuální model z libovolného systému CAD, který podporuje tvorbu objemového nebo plošného modelu. Rapid prototyping je technologický proces, jehož cílem je navržení nového výrobku rychleji, než je možné běžnými technologiemi. Čas potřebný pro stavbu prototypu je značně redukován, čímž jsou sníženy i náklady na jeho výrobu. Bez klasických metod obrábění lze získat během krátké doby libovolně komplikovaný tvar funkčního a dle zvolené technologie i pevnostně vyhovujícího dílu. Technologie rapid prototyping přestává být dominantní pouze pro vývoj nových produktů v automobilovém a leteckém průmyslu, ale uplatňuje se i ve spotřebním průmyslu a zdravotnictví. Při výrobě odpadá nutnost pracovat s technickou dokumentací. Rapid prototyping je moderní směr, který se neustále rozvíjí a napomáhá zlepšit vývojový proces při výrobě prototypů. [1]

Jako potenciální aplikace získává tato technologie postupně pozici výrobní metody pro rychlou a zároveň přesnou výrobu plně funkčních prototypových dílů nebo finálních výrobků pro rozmanitou oblast použití. [1]

Pole působnosti technologie rapid prototyping je velice široké a neustále se rozrůstá. Vzhledem k tomu že tato technologie je relativně nová, její potenciál využití nebyl dosud dostatečně prozkoumán. S neustále rostoucí rychlostí zařízení a stále se rozšiřujícím počtem materiálů vzrůstá i rozsah aplikací této technologie.[1]

Cílem technologie Rapid Prototyping je vytvoření reálného modelu z počítačových dat v co nejkratším čase a v co nejvyšší kvalitě. Historie této technologie sahá do 80. let minulého století, kdy byla vyvinuta technika stereolitografie. Použití této technologie má za následek zrychlení celého procesu vývoje výrobku a tedy i snížení nákladů a zlepšení kvality. Technologie umožňuje již v etapě vývoje ověřit funkci vyvíjeného výrobku, design a ergonomii, ale slouží také k výrobě finálních výrobků tam, kde se jedná o menší počet kusů nebo o výrobu součástí klasickými technologiemi nevyrobitelných.[2]

1.1 Vymezení pojmu rapid prototyping

Podstatou všech technologií rapid prototyping je opakované nanášení materiálu po vrstvách konstantní tloušťky (metoda aditivní) na rozdíl od CNC obrábění, kdy se materiál odebírá ve formě třísky (metoda subtraktivní). Jestliže jsou k dispozici data z konstrukčního CAD programu a je zapotřebí vytvořit fyzický model, rapid prototyping nabízí cestu jak tato data rychle převést do podoby prototypové součásti. Vzniklá prototypová součást může být podle typu použité technologie vytvořena z pryskyřice, termoplastu, vosku nebo kovového prášku. Z tohoto hlediska je zřejmé, že výsledné použití modelu je již od počátku výroby směrodatným hlediskem pro vhodnou metodu 3D tisku pomocí technologie rapid prototyping. Technologie rapid prototyping umožňuje zkrácení etapy vývoje výrobku, což se příznivě projevuje při zvyšování konkurenceschopnosti výrobku na trhu. [1]

Vývoj a navazující procesy v oblasti 3D modelování a 3D digitalizace v posledních letech zaznamenal velký technický nárůst, který umožnil vývoj v oblasti hardware a software. Díky tomuto vývoji je možné řešit stále složitější úlohy s aplikačními možnostmi v běžné strojírenské praxi. V závislosti na výše zmíněných faktorech se rozšířilo využívání 3D modelování, rychlé výroby prototypů a CAD/CAM technologií. [1]

1.2 Princip metody

Data pro tvorbu modelu

Prvním zdrojem dat je skutečná součást, která je naskenována některou metodou Reverse Engineering (RE). Výsledkem procesu skenování je mrak bodů, který je dále převeden na trojúhelníkovou síť polygonů a následně vyhlazen. Síť polygonů může být uložena do vhodného formátu dat a tato data mohou být následně použita odpovídajícím programem k dalšímu zpracování. [1]

Druhým zdrojem dat je virtuální model, který je nakreslen v libovolném systému CAD, který umožňuje vytvářet 3D modely. Není podstatné, zda je model nakreslen nástroji objemového nebo plošného modeláře. Jedinou nutnou podmínkou je, že povrchy virtuálního modelu musí být uzavřené. Model je ze systému CAD exportován ve výměnném formátu dat, nejčastěji se jedná o formát STL, ale mohou být použity i formáty IGES nebo některé další. To platí zejména pro systémy CATIA, Pro/Engineer, SolidWorks atd.

Třetím zdrojem je libovolný CNC řídicí program.[1]

Takto připravená data jsou pak načtena do speciálního softwaru Rapid Prototyping. Virtuální (počítačový) model je rozřezán příčnými řezy s definovaným nastavením vzdálenosti jednotlivých vrstev. Dále se navrhne podpurná konstrukce pro vytváření modelu a pro oddělení modelu od nosné desky. [2]

Na rozdíl od konvenčních metod obrábění, u kterých je materiál z výchozího polotovaru odebrán, je u technologie Rapid Prototyping materiál po vrstvách přidáván. Součást je pro výrobu rozdělena na velké množství jednotlivých vrstev o tloušťce v řádu setin až desetin milimetru, které je možno považovat v podstatě za dvoudimenzionální (2D). Každá vrstva má svůj 2D tvar. Kladením jednotlivých vrstev na sebe lze poměrně snadno vyrobit prostorové předměty značné geometrické složitosti. [2]

V současné době se technologie Rapid Prototyping používá pro vytvoření prostorových modelů složitých objektů, ke kontrole designu navrhovaného objektu k ověření a optimalizaci výrobku. Mimo korekce tvaru je možno např. snáze vybrat z konkurenčních návrhů ten nejlepší. K simulacím v oblastech namáhání, proudění, koncepčního konstruování, designu a archivace 3D objektů. [2]

Rozhodnutí o výběru a použitelnosti konkrétní metody Rapid Prototyping pro daný případ závisí na požadované přesnosti výrobku, nalezení vhodného materiálu pro výrobu součásti, možnosti dodatečného obrobení funkčních ploch součástky.[2]



Obr. 1.1 Výrobky vyrobené metodou rapid prototyping-foceno ve firmě MCAE

1.3 Rozdělení metod rapid prototyping

Základní technologie Rapid Prototyping a používaný materiál:

Tab 1.1 Základní technologie RP [2,3]

Základní technologie Rapid Prototyping	Zkratka	Materiál modelu
Stereolitografie	SLA, SL	Fotopolymer
Solid Ground Cutting	SGC	Fotopolymer, nylon
Selective Laser Sintering	SLS	Polyamid, nylon, vosk, kovové prášky
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	Kovové prášky
Laminated Object Manufacturing	LOM	Papír s jednostranným pojivem
Fused Deposition Modeling	FDM	ABS, vosk, polykarbonát
Multi Jet Modeling	MJM	Termopolymer, akrylátový fotopolymer

Dále se budu zabývat pouze technologií FDM.

1.4 Metoda Fused Deposition Modeling

FDM je technologií aditivní výroby, kterou na konci osmdesátých let dvacátého století vyvinul a v roce 1989 patentoval S. Scott Crump, pozdější zakladatel společnosti Stratasys, jež má tento pojem zajištěn ochrannou známkou. [4]

Princip metody FDM spočívá v natavování termoplastického materiálu navinutého ve formě drátu na cívce, ze které je vtačován do vyhřívané trysky pomocí kladek a následně nanášen po jednotlivých vrstvách na podložku. Součásti jsou vyráběny z ABS nebo ABS+ plastu, polykarbonátu, elastomeru, vosku atd. Metoda vyžaduje stavbu podpor, které se po vyrobení součásti mechanicky nebo chemicky odstraní. Metoda nevyžaduje žádné speciální provozní podmínky, je poměrně nehlučná a materiály se kterými pracuje, jsou netoxické. [1]

Data ve formátu *.stl jsou importována do softwaru CatalystEX, který byl vyvinut společností Stratasys pro potřeby preprocesingu. V tomto softwaru jsou zvoleny atributy tisku, typ zařízení, tloušťka vrstev materiálu, typ podpor, způsob vyplnění objemu modelu, měřítko tisku, orientace modelu v pracovním prostoru atd. [1]

Materiál ve formě drátu navinutý na cívkách je do zařízení vkládán ve speciálních kazetách. Každé zařízení obsahuje 2 kazety – jednu se stavebním materiálem, druhou s materiálem podpor. Materiál postupuje z cívek přes několik kladek, které ho vtačují do extruzní trysky, ve které je ohřát do polotekutého stavu. Stavební materiál a materiál podpor je vytlačován střídavě. Po opuštění trysky je materiál okolním vzduchem ochlazen a ztuhne. Tryska se pohybuje v rovině X, Y dokud nedokončí jednu celou vrstvu součásti.

Poté se celá extruzní hlava posune o tloušťku vrstvy v ose Z směrem nahoru a dojde k vytisknutí další vrstvy. Tímto způsobem se celý proces opakuje, dokud nedojde k vytvoření prototypové součásti. Po ukončení tisku je součást i s podporami a podložkou vyjmuta z pracovního prostoru zařízení. V případě použití rozpustných podpor je součást ponořena do speciálního roztoku, ve kterém jsou podpory rozpuštěny. V případě použití materiálu ABS dojde k mechanickému odstranění podpor. Vyrobené součásti lze následně dále obrábět a povrchově upravovat.

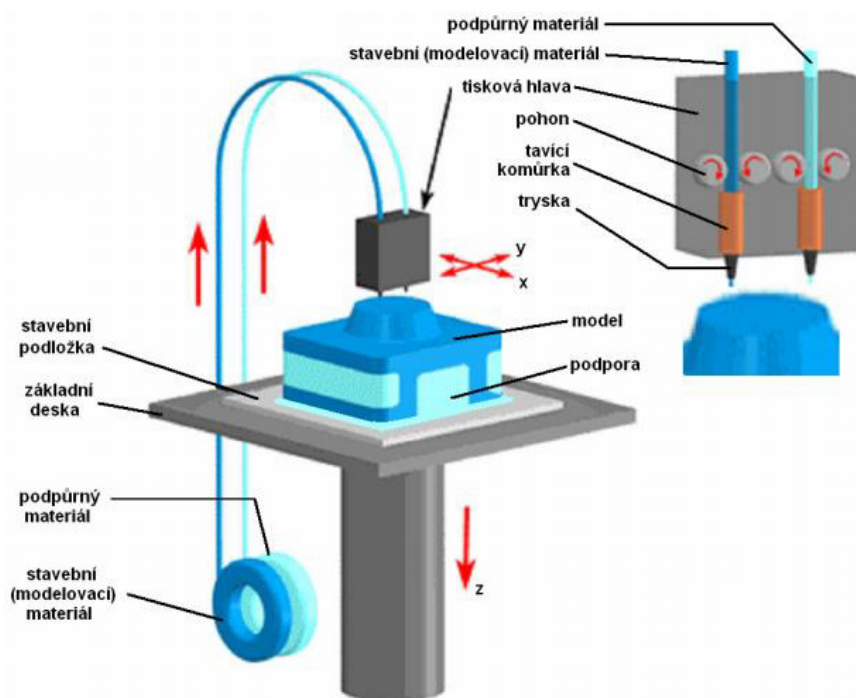
Prototypové součásti vyrobené touto metodou se používají při testování funkčnosti a designu nových případně inovovaných výrobků. Vzhledem k pevnosti používaných materiálů lze tyto modely vystavit zatížení, které odpovídá realitě. [1]

Výhody:

Metodou FDM je možné vyrobit funkční prototypy, které se svými vlastnostmi blíží konečným produktům. Při výrobě součásti vzniká minimální odpad – pouze materiál podpor. Tyto podpory jsou snadno odstranitelné – mechanickým nebo chemickým způsobem. V průběhu výroby součásti je možno kazetu s materiálem vyměnit za novou a pokračovat ve výrobě. [1]

Nevýhody:

Nevýhodou metody FDM je omezená přesnost daná tvarem materiálu použitým pro tvorbu součásti a průměrem výstupní trysky. Proces výroby součásti nelze urychlit – z důvodu principu metody a vlastností materiálu. S vlastnostmi materiálu je spojena další nevýhoda, kterou je smrštění během chladnutí. Tuto vlastnost je možné částečně odstranit vhodným nastavením v softwaru CatalystEX, což vyžaduje určitou zkušenost obsluhy. [1]



Obr 1.2 Princip metody FDM [5]

1.5 Ukázky 3D FDM tiskáren

Ukázky FDM tiskáren, které jsem měl možnost nafotit ve firmě MCAE:

Tiskárna Fortus 450mc od společnosti Stratasys je nejnovější 3D tiskárna, která se ve firmě nachází. Tato tiskárna je schopna tisku funkčních prototypů s danými tolerancemi, výrobní nástroje s vysokými nároky na rychlost, výkon a přesnou výrobu. Tyto tiskárny jsou mnohem rychlejší než jejich předchůdci a jsou vybaveny dotykovými displeji pro jejich přímé ovládání a údržbu. Fortus 450mc staví díly do velikosti $40,6 \times 35,5 \times 40,6$ cm a pracuje s celkem devíti standardními i specializovanými termoplasty např. (ABS-M30, ABS-M30i, ASA, PC, Nylon atd.) [6]



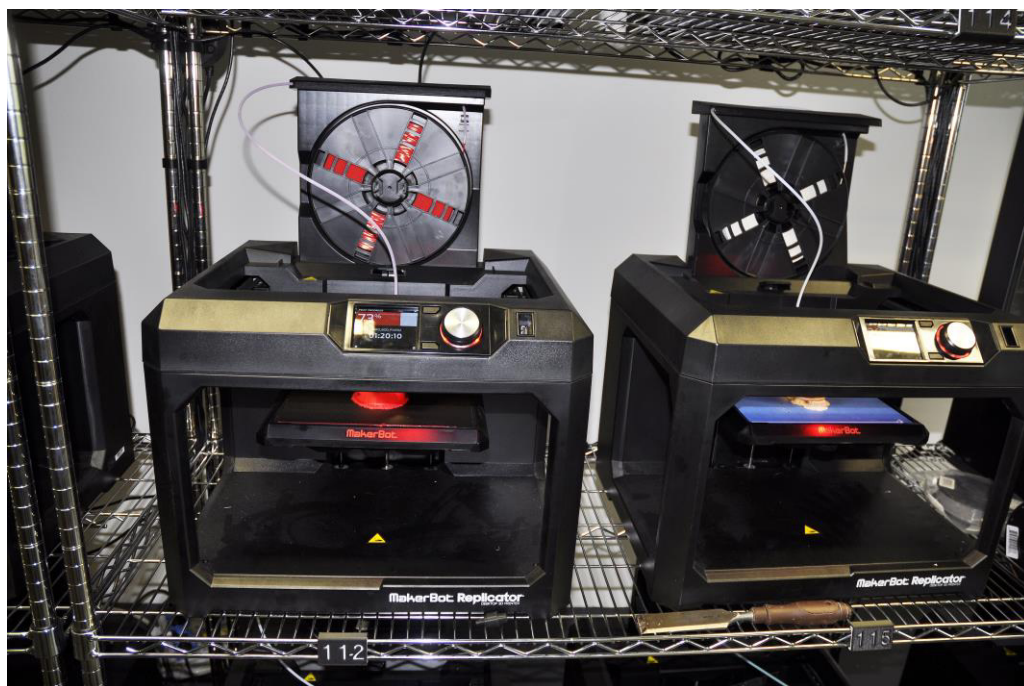
Obr. 1.3 Tiskárna Fortus 450mc

Předchůdce těchto tiskáren je tiskárna FDM 3000 od firmy Stratasys.



Obr. 1.4 Tiskárna FDM 3000

Dalšími tiskárnami jsou například 3D tiskárny značky MakerBot. Jedná se o cenově dostupné stolní 3D tiskárny. Tiskárny jsou velmi jednoduše propojitelné s počítačem přes síť, Wi-Fi nebo USB. Umožňují tisk přímo z flashdisku nebo SD karty. Díky vestavěné kameře a LCD displeji můžeme sledovat proces tisku i třeba na vlastním smartphonu. [7]



Obr. 1.5 Tiskárny MakerBot v provozu

1.6 Materiály používané pro výrobu součástí metodou FDM

Technologie FDM vytváří modely z termoplastů ABS, polykarbonátu (PC) a jejich derivátů dále materiály PPSF, ULTEM či Nylon.

Specifikace používaných materiálů

ABS Plast (Akrylonitrilbutadienstyren)

ABS je amorfní termoplastický kopolymer a je to nejpoužívanější materiál v 3D tisku. Výhodami materiálu je především zdravotní nezávadnost, odolnost vůči vysokým i nízkým teplotám a mechanickému poškození. Neupravený ABS má bílou až krémovou barvu a může se obarvit různými barvivy a pigmenty. Nevýhodou je, že při ochlazování může dojít k narušení povrchu. Pro své vlastnosti je nejvíce využívaným technickým plastem pro výrobu široké škály produktů od domácích potřeb, hraček či hudebních nástrojů až po díly v automobilovém průmyslu. [9,10]

ABSi

ABSi je průhledný termoplast, který je houževnatější než samotný ABS. Umožňuje vytvořit koncepční modely a funkční prototypy využívané obzvláště ve zdravotnictví a dále v automobilovém a leteckém průmyslu. [10]

ABSplus

3D díly z tohoto materiálu jsou mechanicky pevné a stabilní - žádné znatelné deformace, smrštění ani absorpce vlhkosti. ABSplus je o 40% pevnější než standardní materiál ABS. Vzhledem k tomu, že ABSplus pracuje s rozpustnými podpůrnými materiály, není při jejich odstraňování zapotřebí ručního zásahu, a to i v případě složitých tvarů a dutin. [8,10]

ABS-M30

ABS-M30 je o 25 až 70% pevnější než standardní ABS. Proto se hodí k vytváření koncepčních modelů a ověřování výroby. ABS-M30 má vyšší pevnost v tahu, ohybu odolnost proti nárazu a vyšší tvrdost. Pevnost spojení jednotlivých vrstev je podstatně vyšší. To má za následek realističtější funkční testy a vyšší kvalitu dílu pro konečnou spotřebu. V kombinaci s FDM Technologií lze dosáhnout výrobků, které jsou pevnější a realističtější

Barevná škála materiálu ABS-M30 je bílá, černá, tmavě šedá, červená a modrá. [10]

ABS-M30i

ABS-M30i má vysokou pevnost. Součásti vyrobené z ABS-M30i jsou biokompatibilní s vynikajícími mechanickými vlastnostmi a mohou být sterilizovány gama zářením, nebo metodou EtO (Ethylen Oxide) ve sterilizačních komorách. Tento konstrukční termoplast využívá rozpustného podpůrného materiálu, má dobrou mechanickou pevnost a je v souladu s normou ISO 10933. [10]

ABS-ESD7

ABS-ESD7 je elektrostaticky disipativní materiál vhodný pro koncové, elektronické výrobky, průmyslová zařízení a přípravky pro montáž elektronických součástí. Ideální je tedy tam, kde hrozí nebezpečí poškození statickým nábojem, snížení výkonu nebo výbuchu, také je vhodný do prašných prostředí. [10]

PC (polykarbonát)

Nejvíce rozšířený průmyslový termoplast. Pomocí PC lze vyrábět funkční prototypy, nástroje a koncové součásti ze známého odolného materiálu. Vysoká pevnost v tahu (i za vyšších teplot) a v ohybu je ideální pro náročné potřeby, náradí a upínače nebo např. i šablony pro ohýbání. [10]

PC-ABS

PC-ABS je jedním z nejvíce používaných průmyslových termoplastů, protože nabízí ty nejlepší vlastnosti obou materiálů, takže pevnosti a tepelné odolnosti PC a pružnosti ABS. Tento materiál je nejvíce používán v automobilovém průmyslu nebo pro elektronické a telekomunikační aplikace. PC-ABS je cenově dostupné řešení a vhodná volba všude tam, kde je nezbytná pevnost a tuhost ve spojení s mechanickou a teplotní odolností. [10]

PC-ISO

Jedná se o nejsilnější, nejvíce tepelně odolný biokompatibilní materiál. Součásti vyrobené z tohoto materiálu mají vynikající mechanické vlastnosti a mohou být sterilizovány gama zářením, nebo metodou EtO (Ethylen Oxide) ve sterilizačních komorách a jsou v souladu s normou ISO 10993 a USP Class IV. Využití má zejména ve farmacii, balení potravin a drogistických výrobků. [10]

PPSF/PPSU

Díly vyrobené z tohoto termoplastu jsou odolné vůči působení vyšších teplot a chemických látek, což je využíváno nejvíce v automobilovém, leteckém, kosmickém nebo zdravotnickém průmyslu. PPSF/PPSU nabízí nejvyšší tepelnou odolnost ze všech termoplastů a zároveň dobrou mechanickou pevnost a odolnost. [10]

ULTEM 9085

Pevný, lehký a odolný, vysoce výkonný termoplast Jeho tepelné, mechanické a chemické vlastnosti ho činí nejlepším ve většině kategorií. ULTEM 9085 je díky jeho FST ratingu (flame, smoke, toxicity) ideální pro letecký a kosmický průmysl, automobilový průmysl a vojenské aplikace. Ideální pro použití v dopravních prostředích – automobilech, letadlech, autobusech, vlacích, lodích atd. Vhodný je rovněž pro všechny aplikace, kde je zapotřebí vysoký poměr pevnost/hmotnost. To umožňuje konstrukčním a výrobním inženýrům tisknout pokročilé funkční prototypy a koncové spotřební díly. [10]

Nylon 12

Nylon 12 je nový materiál pro FDM technologii. Tento materiál je vhodný pro pokročilé prototypy a vlastní nástroje, které vyžadují vysokou odolnost proti únavě. Dále tento materiál nabízí nejvyšší houževnatost ze všech FDM termoplastů, stejně tak má vynikající chemickou odolnost. Vhodný je do leteckého, či automobilového průmyslu, kde pokryje vlastní výrobu nástrojů, přípravků či krytů. Dále je vhodný pro součásti, které jsou namáhány cyklickým zatěžováním. [10]

Srovnání mechanických vlastností používaných materiálů

Srovnání mechanických vlastností výše zmíněných je uvedeno v tab.1.6 níže. Data jsou převzata od společnosti Stratasys.

Tab. 1.2 Mechanické vlastnosti materiálů vhodných pro FDM [11]

Materiál:	ABS	ABS plus	ABS-M30	PC-ABS	PC-ISO	PC	ULTEM-9085	PPSF PPSU
Pevnost v tahu [MPa]	22	37	36	41	57	68	71.64	55
Modul pevnosti v tahu [MPa]	1627	2320	2413	1900	998	2280	2200	2068
Poměrné prodloužení na mezi kluzu [%]	6	3	4	6	4.3	4.8	5.9	3
Pevnost v ohybu [MPa]	41	53	61	68	90	104	115.1	110
Modul pružnosti v ohybu [MPa]	1834	2250	2320	1900	2140	2230	2500	2200
Teplota měknutí [%]	90	96	96	110	133	138	153	189

2 VYSOKÁ HISTORICKÁ KOLA

2.1 Historie a vývoj jízdního kola

Jízdní kolo nebo-li bicykl je jednostopé vozidlo poháněné silou lidských svalů. Za vynálezce jízdního kola bývá považován Karel Friedrich von Drais ze Sauerbronnu v Bádensku, ale neustále se vedou spory o jeho prvenství. První vozidlo poháněné lidskou silou sestrojil kolem roku 1650 norimberský hodinář Johan Hautzche. Dále roku 1791 Francouz Medé de Sivrac zkonstruoval tzv. „rychlloběžku“ –céleriferu. Další pozoruhodný samohyb bylo možné spatřit v roce 1801 v slavnostním průvodu při korunovaci ruského cara Alexandra I. Tento stroj byl pozoruhodný tím, že byl vybaven na předních kolech šlapadly. V průvodu ho řídil sám vynálezce uralský nevolník Artamov. [12]

Až v roce 1813 zkonstruoval Karel Friedrich von Drais tzv. „draisinu“, jak byl vynález nazýván, stal se opravdovým lidovým vozítkem. Aby nebylo sporů o prvenství málo, objevily se podobné stroje jak v Anglii tak Francii a Drais měl potíže patentovat draisinu jak doma v Německu, tak i v ostatních státech. Draisovo vozidlo nebylo úplně dokonalé, a jízda na něm byla opravdu náročná. Za jednu hodinu dokázal zdatný sportovec ujet asi 10 km, ale při stoupání do kopce se nemohl vyrovnat rychlosti chodce. Pocit z jízdy byl ale tak silný, že se draisina šířila po celém světě. Ačkoli odpichování od země bylo značně náročné, byly pokusy draisinu vylepšovat. [12]



Obr. 2.1 Jízda na draisině [13]

Až roku 1840 vynalézá skotský kovář Kirkpatrick Macmillan kolo s pohonem zadních kol pomocí táhel. Dále následoval Milius z Themaru v Sasku, který v roce 1845 přidělal na přední kolo draisiny kliky se šlapadly. V roce 1863 použil Francouz Pierre Michaux šlapadla na přední kolo, nechal si vozidlo patentovat a o tři roky opatřil kolo brzdou. Svůj stroj nazval „vélocipede“. Výhodou tohoto stroje bylo umožnění jízdy bez dotyku nohou se zemí. Angličan Madison v roce 1867 představil v kolech drátěné loukotě místo dřevěných. Následující rok 1868 představila francouzská firma Mayer and Co bicykl s řetězovým převodem na zadní kolo, ale bohužel nevzbudila zájem. Kola dostávaly různé pojmenování. V Českých zemích se jim říkalo „kostitřas“ nebo „mišódka“. [14]



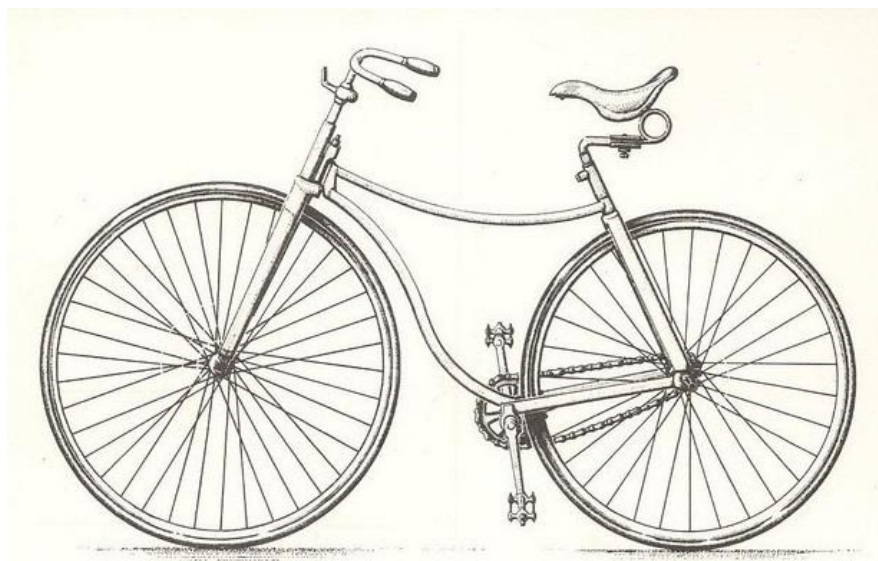
Obr. 2.2 Pierre Michaux a jeho kostitřas [14]

V roce 1869 začíná firma Mayer and Co nahrazovat dřevěné rámy železnými. 11. 8. 1870 bylo v Anglii patentováno první vysoké celokovové kolo s pryžovou obručí v ráfcích. Konstruktéři tohoto kola byli James Starley a William Hillman. Roku 1872 se začínají objevovat první vysoká kola, nebo-li velocipedy (kositřasy). Přední kolo tohoto velocipedu bylo konstruktéry zvětšováno na průměr 150-200 cm. Zadní kolo bylo podstatně menší. Jezdec seděl nad předním kolem, kde se nacházely i řídítka. Tento typ kola se udržel přibližně na 20 let. O čtyři roky později 1878 Pařížan Gilme znovu objevuje řetězový pohon.



Obr 2.3 Vysoké kolo z roku 1884[14]

V roce 1888 sestrojil John Kemp Starley (synovec Jamese Starleye) variantu kola Rover. Průměr předního kola se velice blížil průměru zadnímu a pohon obstarávaly, pedály, kliky řetěz a ozubená kola. Typ tohoto rámu se stal vzorem na dalších sto let. Roku 1890 nahradil irský zvěrolékař John Boyd Dunlop pryžové obruče na ráfcích pneumatiky plněnými vzduchem. [15]



Obr 2.4 Kolo Rover 1888[15]

2.2 Historie a vývoj jízdního kola v Čechách

Jedni z velkých průkopníků a později i výrobců vysokých kol byli v Čechách Jan a Josef Kohoutovi (Josef vyhrál v roce 1882 ve Vídni závod na jednu míli), dále pan Augustin Vondřich, Václav Laurin a Václav Klement. [16]

Jan Kohout sehrál v historii výroby vysokých kol v Čechách klíčovou roli. Narodil se v obci Křečkov ve středních Čechách mezi Nymburkem a Poděbrady v rodině nemajetného rolníka. Vyučil se truhlářem a dostal se do dolnorakouského Löbersdorfu, kde prožil šest let. Pronikl do výroby mlýnských složení, stal se současně i strojníkem a po nabytých zkušenostech se mohl osamostatnit. První práce, kterou přijal jako mistr, byla přestavba parního mlýna v Čejči na Moravě, následovala stavba parního mlýna v Lovosicích a do třetice na Smíchově, tehdy ještě samostatné obci u Prahy. Tady se také v roce 1849 usadil a postavil svoji továrnu. Během let vyrostla na smíchovském pozemku velká továrna na mlýnské a hospodářské stroje. 16. 11. 1880 se v továrně Jana Kohouta sešlo několik mladých mužů, kteří jízdu na vysokém kole propadli a kteří se rozhodli ustavit klub velocipedistů. Klub začal podnikat společné výlety. [16]

Na historii starých poctivých českých kol navázali i písečtí velocipedisté. Po několika sólo jízdách nadšenců došlo v roce 2007 k obnovení činnosti Klubu velocipedistů při příležitosti 120 – tého výročí jeho založení. Obnovený klub začíná své akce v Palackého sadech a snaží se o dochování historie českých jízdních kol včetně dobového oblečení. [16]

U nás na Moravě se výrobě historických velocipedů věnuje pan Zdeněk Měsíček z Čeložnic. Vyrábí je nejen pro nadšence z České republiky, ale vyváží je i do jiných států světa – např. Německo, Rusko, Anglie, USA atd. Na vývoji a vlastní realizaci se podílí společně se svými deseti zaměstnanci. Díky jeho vstřícnosti a ochotě jsem mohl rozvinout téma své bakalářské práce.

2.3 Brzdný segment vysokého historického kola

Rozhodl jsem se pro vypracování součásti brzdného segmentu vysokého historického kola. Brzda je důležitou součástí na vysokém kole z hlediska bezpečnosti pro jezdce. Jezdec velocipedu sice brzdí šlapátky, ale pokud se rozjede moc rychle, anebo potřebuje přibrzdit si z kopce tak použije právě ruční brzdu. Dřívější závodní kola dokonce žádnou ruční brzdu neměla a tak docházelo k častým pádům. Brzda musí být řádně vyrobena a upevněna na kole, nesmí docházet k poruchovosti a příliš velkému opotřebenosti. Důležité je navrhnout vhodný tvar, tak aby vyhovoval pevnostním požadavkům a bylo dosaženo maximálních brzdných účinků. Dále je důležité dodržet rozteč děr a tloušťku „pásku“ 5 mm, aby bylo možno brzdný segment bez problému přišroubovat.

Brzdný systém vysokého historického kola můžete vidět na obrázku 2.5



obr 2.5 vysoké historické kolo

3 NÁVRH MODELU

V dnešní době existuje mnoho CAD programů, které dokáží vytvářet 3D modely. Můžeme do této řady zařadit systémy jako CATIA, Pro/Engineer, SolidWorks, Rhinoceros a další. Já si pro svůj návrh modelu brzdného segmentu vysokého kola vybral 3D CAD program Autodesk Inventor Professional 2016 hlavně díky tomu, že je možné ho zdarma a volně stáhnout ve studentské verzi.

3.1 Autodesk Inventor

Autodesk Inventor je strojírenský 2D/3D CAD program firmy Autodesk, který využívá parametrické, adaptivní a přímé modelování součástí a sestav, z nichž je následně generována výkresová dokumentace (pohledy, detaily, řezy...).

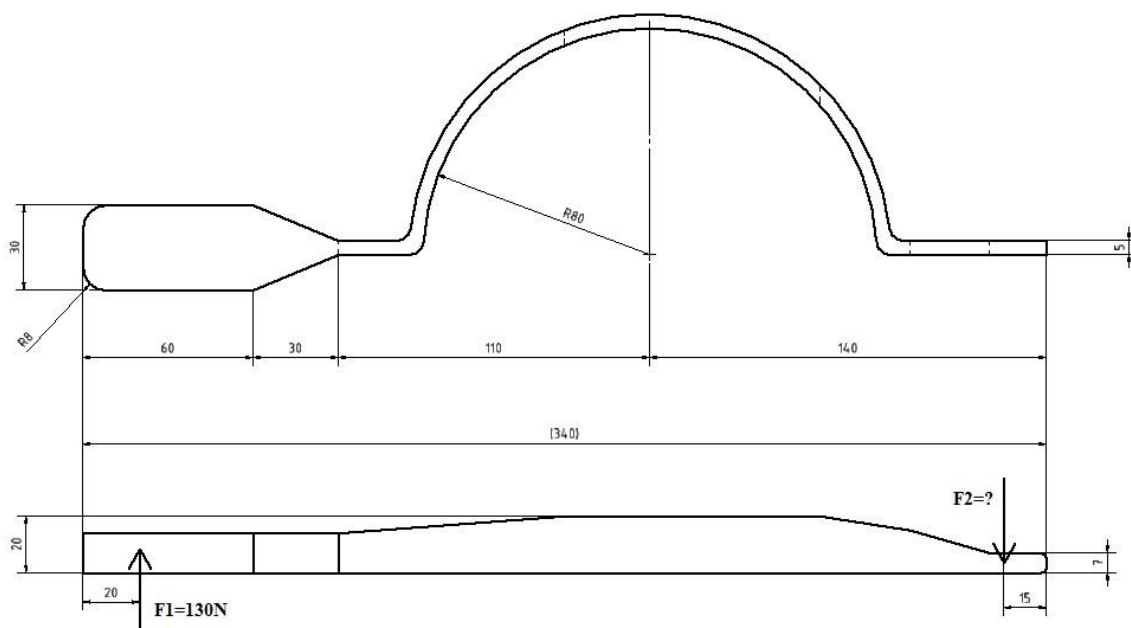
Program pracuje se souborovými formáty IPT(součásti), IAM (sestavy), IDW/DWG (výkresy) a IPN (prezentace). Podporuje ale i import a export CAD dat z řady dalších formátů (např. STEP, IGES, CATIA, Pro/E, Solidworks atd.) [17]

Autodesk Inventor Professional dále rozšiřuje možnosti Inventoru a přináší navíc funkce pro práci s kabelovými svazky, trasy drátů, vylepšené potrubní funkce, rozšířenou knihovnu potrubních prvků a centrální úložiště dokumentů Autodesk Vault. Dále má v sobě výpočty zatížení ANSYS, tvorbu MKP sítě dynamické simulace apod. [18]

3.2 Návrh konstrukce

Návrh prototypu vychází ze základních parametrů, které je třeba dodržet pro správnou funkčnost brzdného systému. Výrobek bude přišroubován a uchycen k vysokému kolu, takže je důležité dodržet rozteč děr, která je u těchto kol 105 mm.

Dále jsem si také odměřil a vymodeloval brzdnu páku, abych mohl vypočítat sílu, která působí na danou součást. Vstupní síla do páky je $F_1=130\text{N}$, což je síla, na kterou se běžně konstruují brzdy u jízdních kol.



Obr 3.1 Náčrt brzdne páky se vstupními silami

Výpočet síly F_2 působící na druhý konec ramene páky:

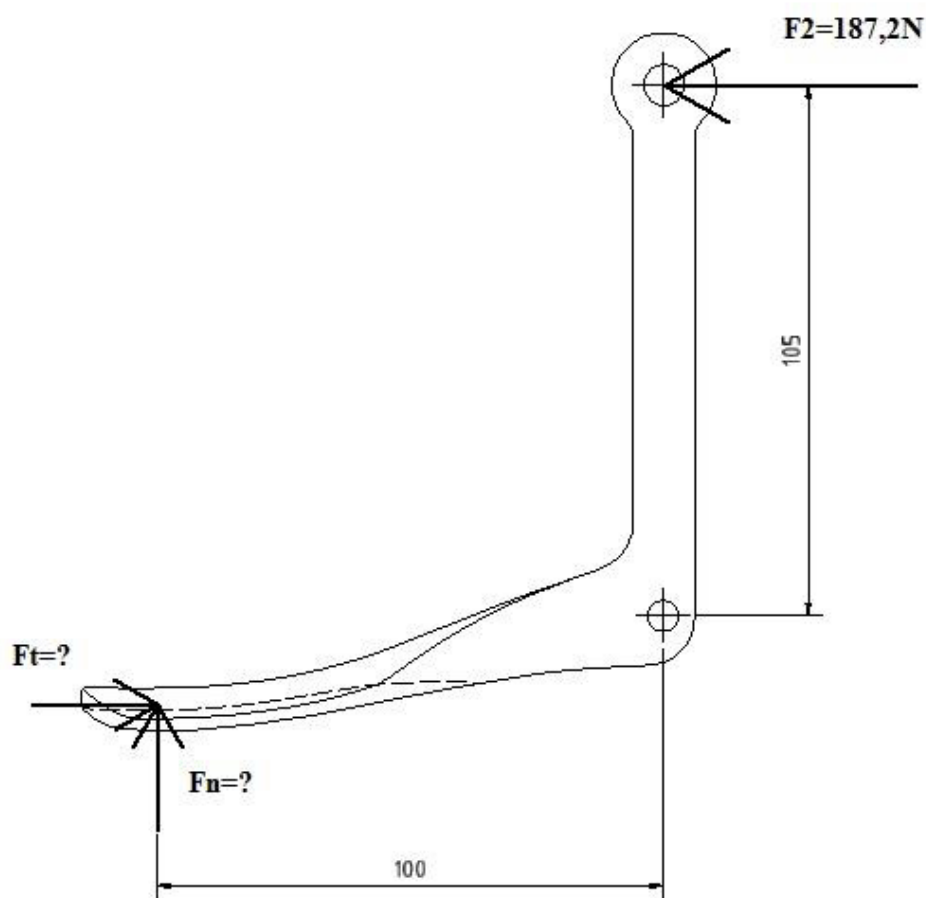
Vycházíme z momentové rovnice rovnováhy k ose otáčení, tedy čepu, který je v půli oblouku brzdové páky.

$$M_{O_1}: F_1 * (40 + 30 + 110) = F_2 * (140 - 15)$$

$$130 * 180 = F_2 * 125$$

$$F_2 = 187,2 \text{ N}$$

Dále si můžeme vypočítat normálovou sílu F_n , která působí od gumy na brzdu.



Obr 3.2 Náčrt sil působících na brzdě

Vycházíme z momentové rovnice rovnováhy k ose otáčení, tedy čepu, který se nachází na konci rovné části brzdy. Vše můžete pozorovat na následujícím náčrtu.

$$M_{O_2}: F_2 * 105 = F_n * 100$$

$$187,2 * 105 = F_n * 100$$

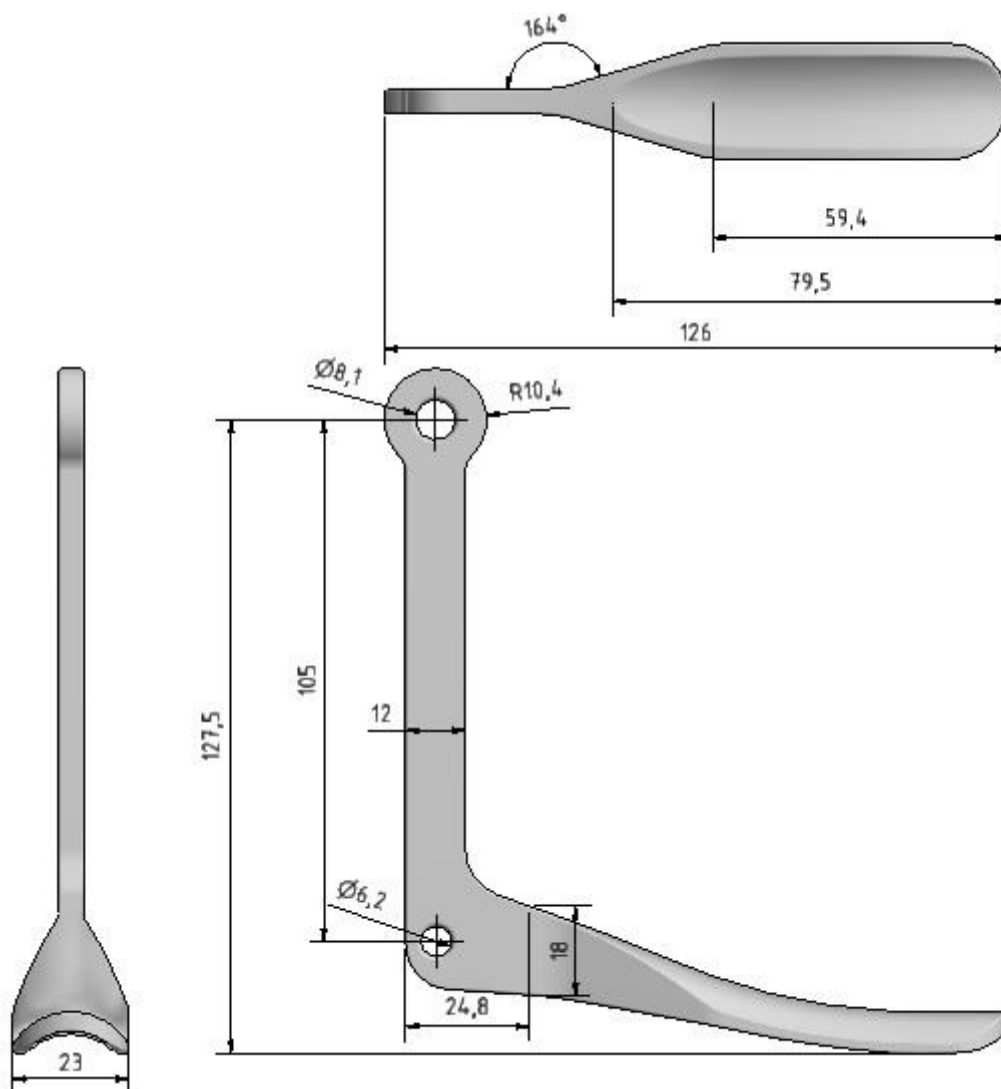
$$F_n = 196,56 \text{ N}$$

Poslední co si můžeme vypočítat, je třecí síla, která působí proti pohybu gumy. Na výpočet třecí síly můžeme aplikovat vzorec z fyziky. $F_t = F_n * f$; kde f je koeficient tření. Koeficient tření je bezrozměrná veličina, která závisí na konkrétní dvojici látek, které spolu přicházejí do styku. Existují tabulky, ve kterých jsou stanoveny hodnoty f . Bohužel v těchto tabulkách není definována hodnota f pro plast-pryž ani ocel-pryž. Nicméně tato veličina je proměnná a záleží také na aktuálním opotřebení pneumatiky, množství usazeného šterku, bahna či vody. Budeme tedy uvažovat universální hodnotu, která se používá nejběžněji $f = 0,4$.

Pro $f = 0,4$ vychází třecí síla $F_t = 196,56 * 0,4 = 78,624N$

3.3.1 První varianta – Varianta 1a

Součást byla modelována řezem v polovině. Začal jsem tak, že jsem si do náčrtu zakreslil a zakótoval základní tvar součásti. Ten byl nakonec vysunut funkcí vysunutí do prostoru o tloušťku 2,5 mm. Dále jsem si přes sdílený náčrt přidal materiál ke spodní části brzdy o tloušťce 9,2 mm. Následně jsem si provedl zaoblení a domodelování tvaru spodní části brzdy. Dosedací plochu na gumu jsem vyrobil úběrem materiálu podle křivky s využitím funkce tažení. Dále se udělalo zaoblení, aby součást neměla ostré hrany. Nakonec byla tahle polovina brzdy zrcadlena a tím se docílil požadovaný tvar.

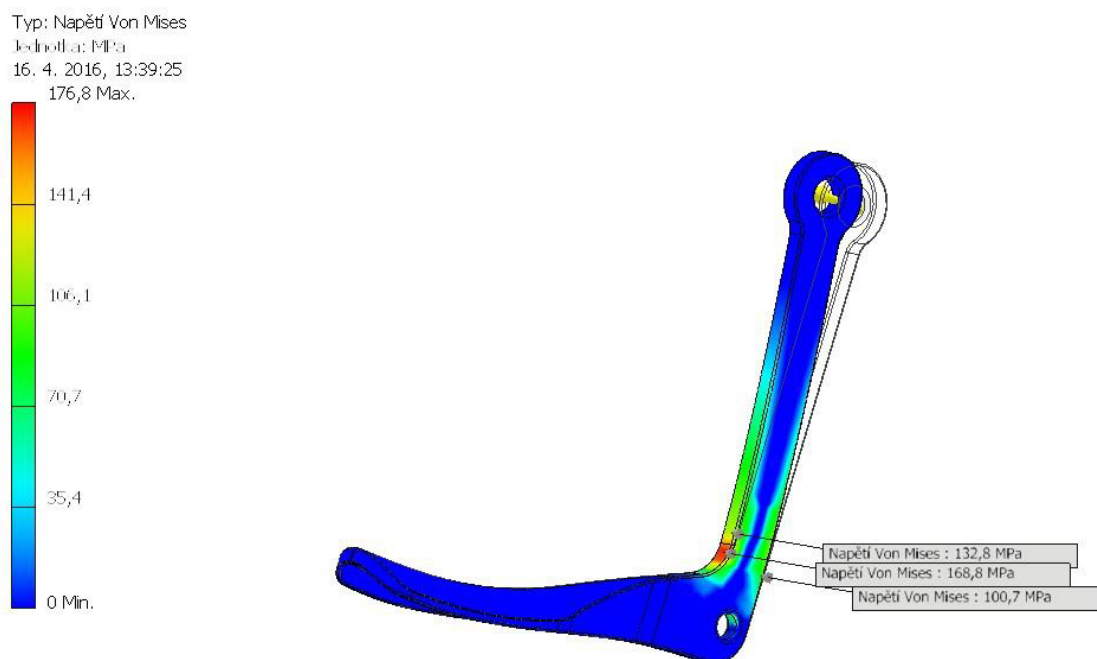


Obr 3.3 Obrázek první varianty brzdy ve 3 pohledech se základními rozměry



Obr 3.4 Pohled na první variantu brzdy ve 3D

První varianta, kterou jsem modeloval, je reálná součást, která se momentálně používá. Pro výrobu z oceli je nejvýhodnější, protože má vhodný tvar, na který není potřeba velký objem materiálu. Nicméně tato varianta pro 3D tisk z materiálu ABS není vhodná, protože je součást namáhána na velká napětí. Simulaci napětí můžete pozorovat na obr. 3.5.



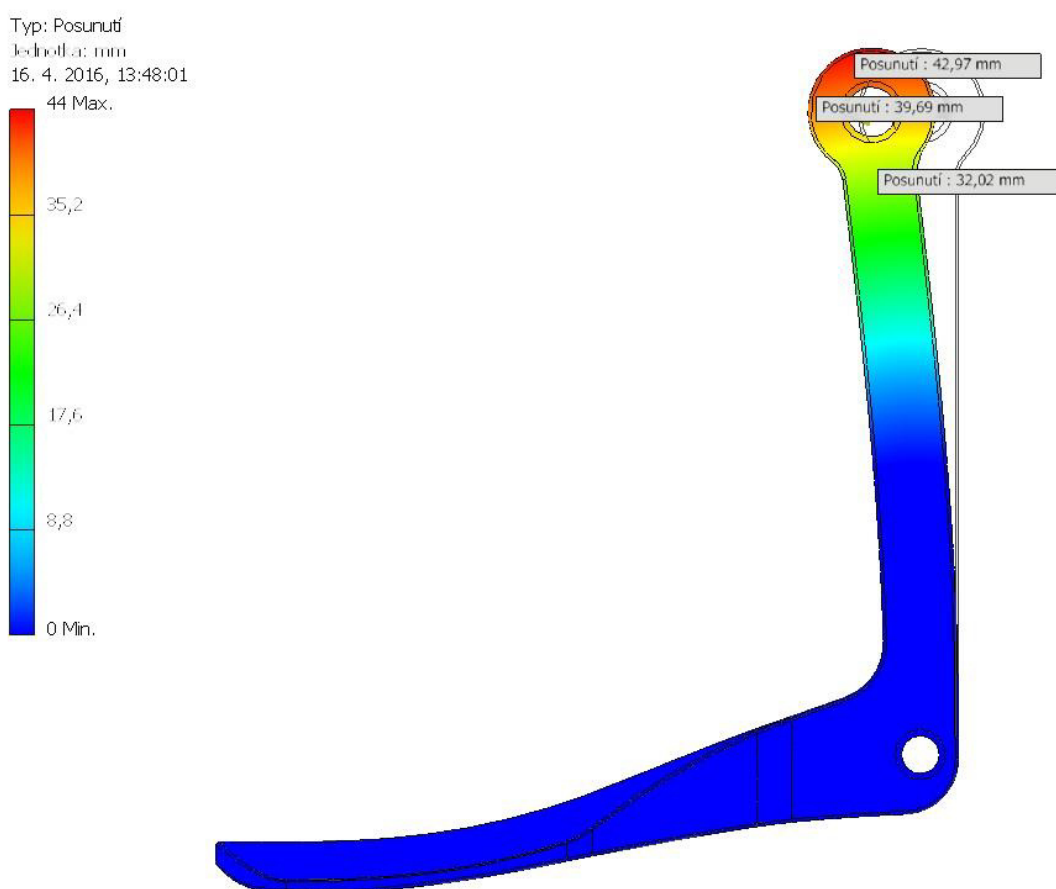
Obr 3.5 Průběh napětí na variantě 1a

Vstupní parametry byly nastaveny na vstupující sílu o velikosti 187,2 N, síla působí v ose x na vrchní díru, jak můžete vidět na obrázku. Materiál byl použit ABS plast. Vazby byly nastaveny ve spodní díře - čepová (Vazba svorky v programu Inventor) a pevná vazba, ze spodu simulováno, že je brzda opřena o kolo. Dotyky a síť KP si program nastavil sám.

Simulace není úplně přesná, protože modul pevnostní analýzy není plně hodnotným výpočtovým nástrojem. Pokud bychom chtěli upřesnit simulace napětí, tak by bylo vhodné použít výpočtový software jako je např. Autodesk Simulation nebo výpočetní systém Ansys.

Jak můžete vidět na obrázku, tak velikosti napětí přesahují hodnoty 100 MPa, součást by byla velmi namáhána na ohyb a dlouho by z plastu nevydržela. Je nutno buď změnit materiál, bohužel v dnešní době neexistuje plast, který by snesl podobná namáhání, tak je potřeba pozměnit konstrukci.

Na obr. 3.6 můžete vidět posunutí, které u varianty 1a z materiálu ABS plast dosahuje až do míry 40 mm. V pozadí je možno vidět původní část.

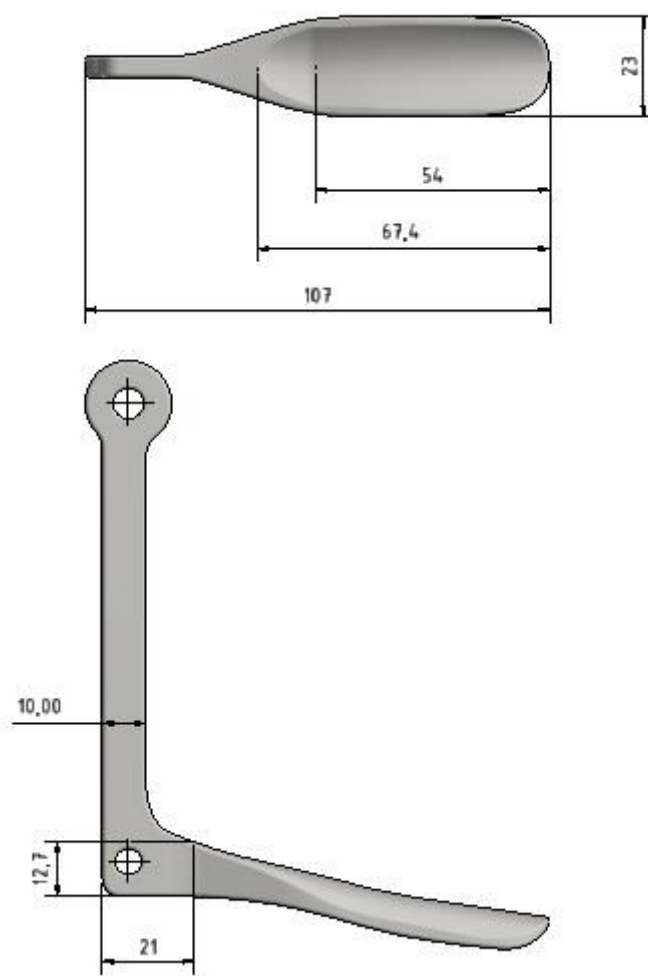


Obr 3.6 Simulace posunutí na variantě 1a

3.3.2 Varianta 1b

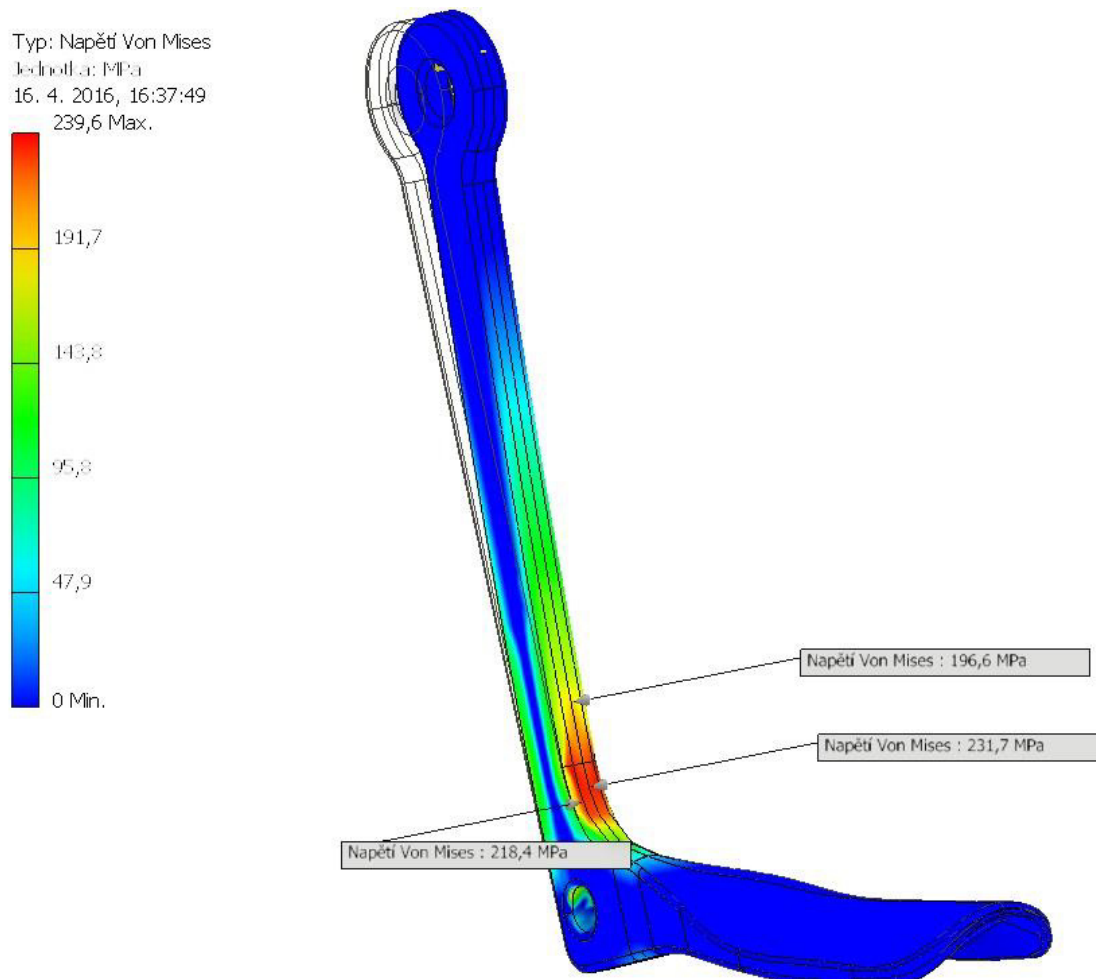
Připravil jsem si také jednu variantu, která není úplně ideální z hlediska pevnosti, ale používala se dříve u vysokých kol. Zkušenostmi se zjistilo, že nevydrží tak dlouho, jak je potřeba. Brzda měla totiž menší brzdnou plochu, brždění nebylo zdaleka tak efektivní, tím pádem se od výroby této brzdy upustilo.

Rozdíly v konstrukci můžete vidět na následujících pohledech. Varianta 1b je zeslabená. Má o 2 mm užší rovnou část brzdy a méně materiálu u spodního otvoru, kde je součást přišroubována ke kolu.



Obr 3.7 Obrázek varianty 1b brzdy ve 2 pohledech se základními rozměry

Simulaci napětí můžete pozorovat na dalším obrázku. Když porovnáme rozdíly napětí na obou brzdách, tak zde působí napětí ještě o 60 MPa větší. Což způsobuje větší deformace i posunutí.

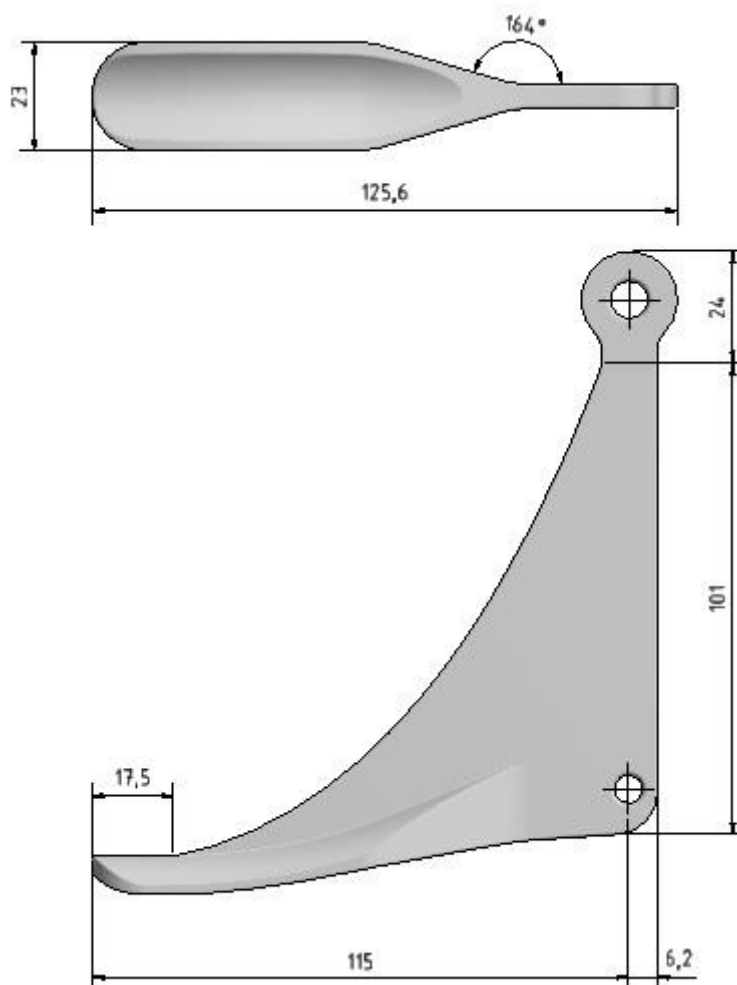


Obr 3.8 Průběh napětí na variantě 1b

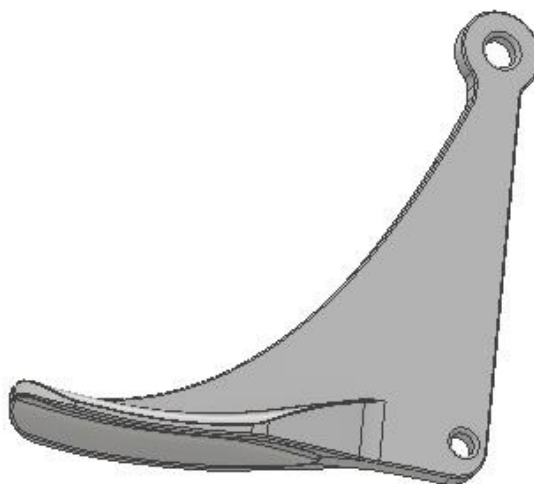
Je možno vidět, že obě varianty jsou tedy nevyhovující z hlediska napěťové a deformační charakteristiky. Přejdeme tedy k dalším variantám. Ty se v současnosti z oceli nevyrábí a jsou pouze mnou navrženy, tak aby vydržely zadané napětí.

3.4 Druhá varianta

Druhá varianta se modelovala stejným způsobem jako varianta první. Abychom však docílili větší pevnosti, byl k součásti podél křivky přidán materiál o tloušťce 5 mm. Součást splňuje pevnostní požadavky. Mohli bychom navrhnout variantu, která by měla lepší mechanické vlastnosti, ale její tvar by se nehodil z estetické stránky k historickému vysokému kolu. Proto jsme se snažili navrhnout součást tak, aby neměla ostré hrany a její tvar se sladil s kolem. Na výsledný produkt se můžete podívat na následujícím obrázku.



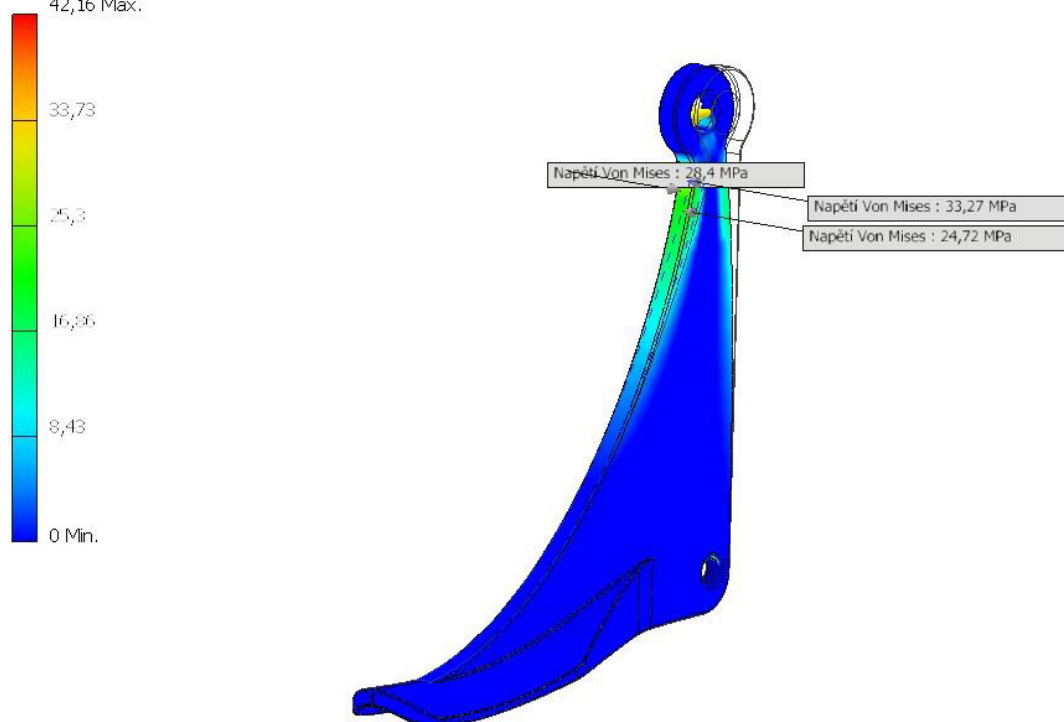
Obr 3.9 Obrázek druhé varianty brzdy ve 2 pohledech se základními rozměry



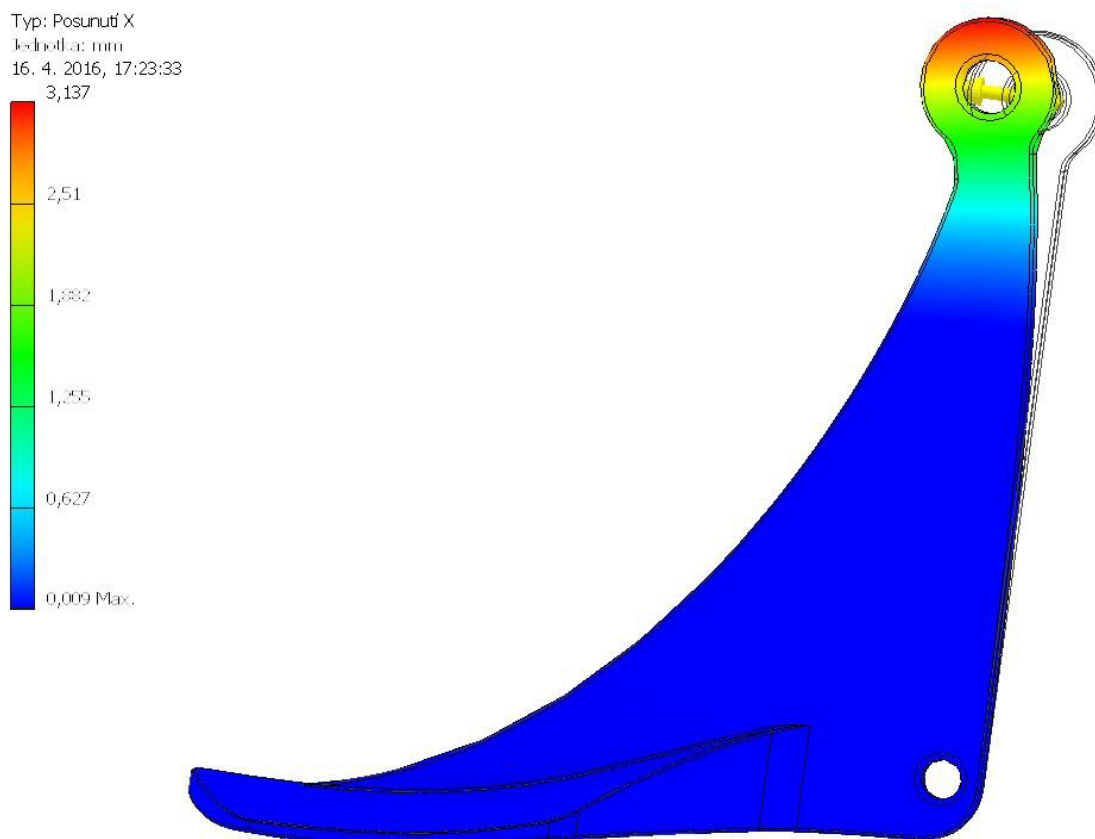
Obr 3.10 Model druhé varianty ve 3D

Na následujících obrázcích lze vidět průběh napětí respektive posun.

Typ: Napětí Von Mises
Jednotka: MPa
16. 4. 2016, 17:28:29
42,16 Max.



Obr 3.11 Průběh napětí u varianty 2

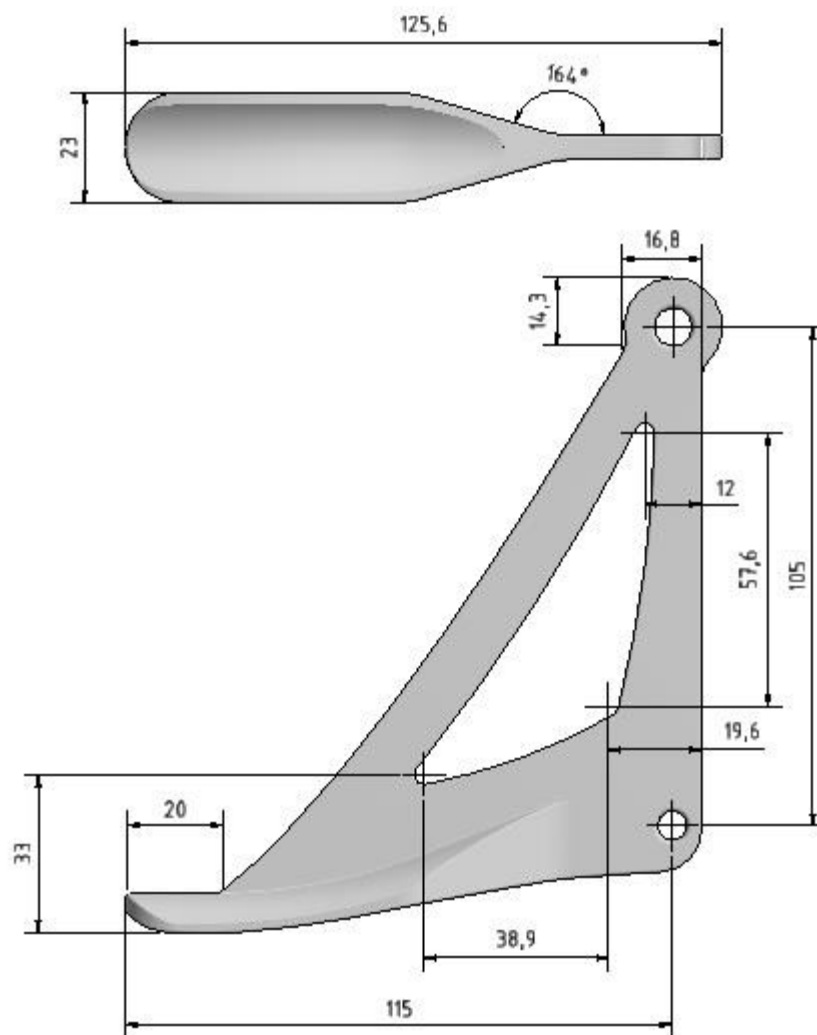


Obr 3.12 Posunutí u varianty 2

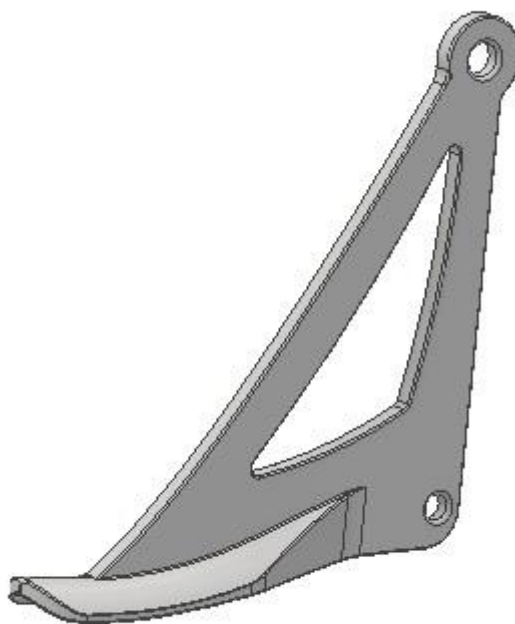
Zde je dokázáno, že dílec už vydrží napětí v ohybu. Vstupní parametry jsou nastaveny stejně jako při simulaci napětí u varianty 1. Jako materiál pro simulaci byl zvolen znovu ABS plast. Napětí v dolní části jsme eliminovali přidáním velkého množství materiálu. Největší napětí se koncentruje pod vrchní dírou. Maximální napětí bylo naměřeno 42,16 MPa, posun byl naměřen 3,154 mm do osy x.

3.5 Třetí varianta

Varianta číslo 3 má vedenou výztuhu už dříve. Byla modelována podobně jako varianta 2. Základ zůstává stejný s variantou 1, jen je přidán materiál vysunutím po jiné křivce, než bylo u varianty 2. Aby nebyl objem materiálu na této součásti tak velký, byl uvnitř součásti vymodelován otvor na ušetření materiálu. Tím pádem bylo docíleno lepšího estetického vzhledu součásti. Otvor byl vymodelován v náčrtu pomocí křivek a zaoblení.



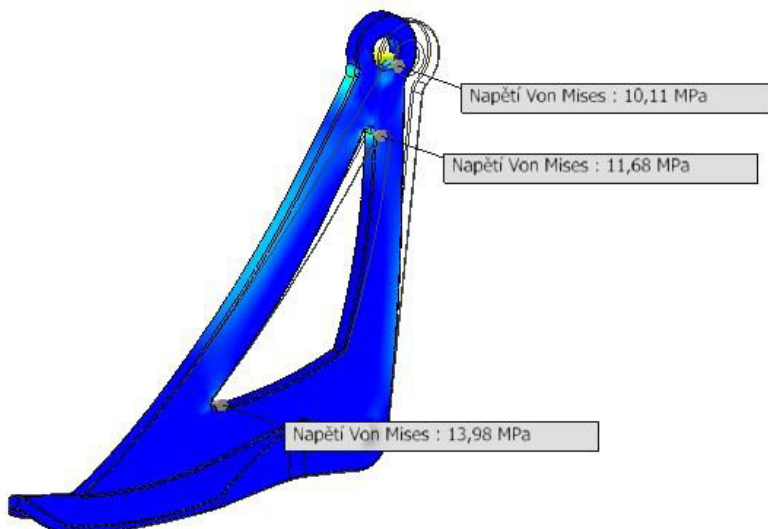
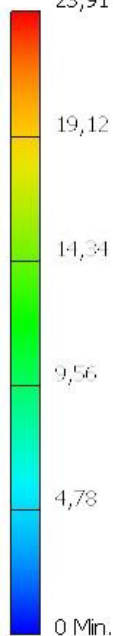
Obr 3.13 Obrázek třetí varianty brzdy ve 2 pohledech se základními rozměry



Obr 3.14 Model třetí varianty ve 3D

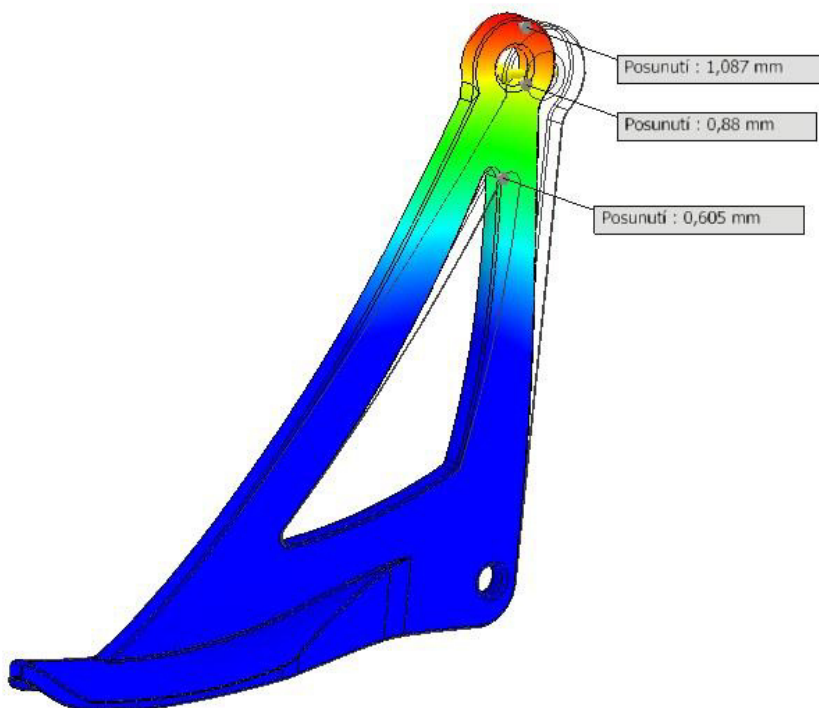
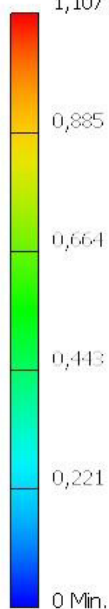
Z následujících obrázků můžeme vyčíst, že varianta 3 má nejlepší mechanické vlastnosti. Při stejných vstupních parametrech lze pozorovat, že vyskytující se maximální napětí má hodnotu 23,91 MPa a maximální posun způsobený silou je pouze 1,107 mm. Lze konstatovat, že výztuha je dostatečná a součást by měla vydržet zatížení i pokud by byla vyrobena z plastového materiálu.

Typ: Napětí Von Mises
Jednotka: MPa
16. 4. 2016, 18:32:59
23,91 Max.



Obr 3.15 Průběh napětí u varianty 3

Typ: Posunutí
Jednotka: mm
16. 4. 2016, 18:35:38
1,107 Max.



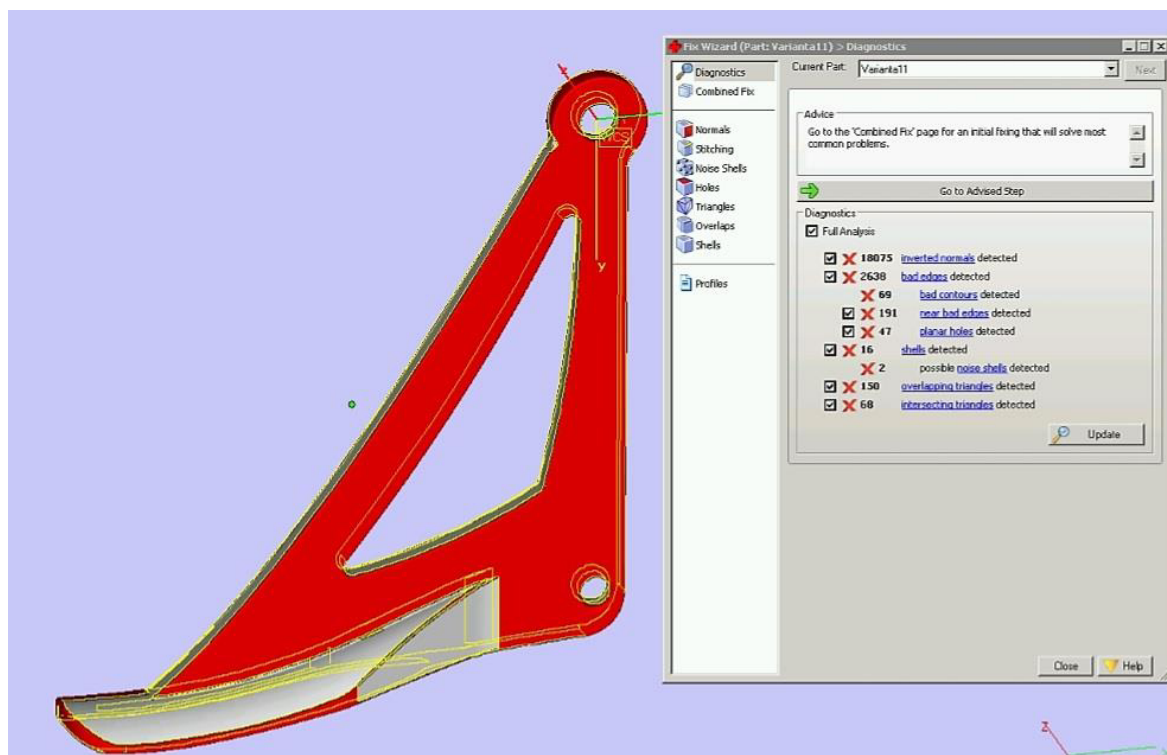
Obr 3.16 Posunutí u varianty 3

4 VÝROBA DANÝCH SOUČÁSTÍ NA 3D TISKÁRNĚ

4.1 Program Magics16

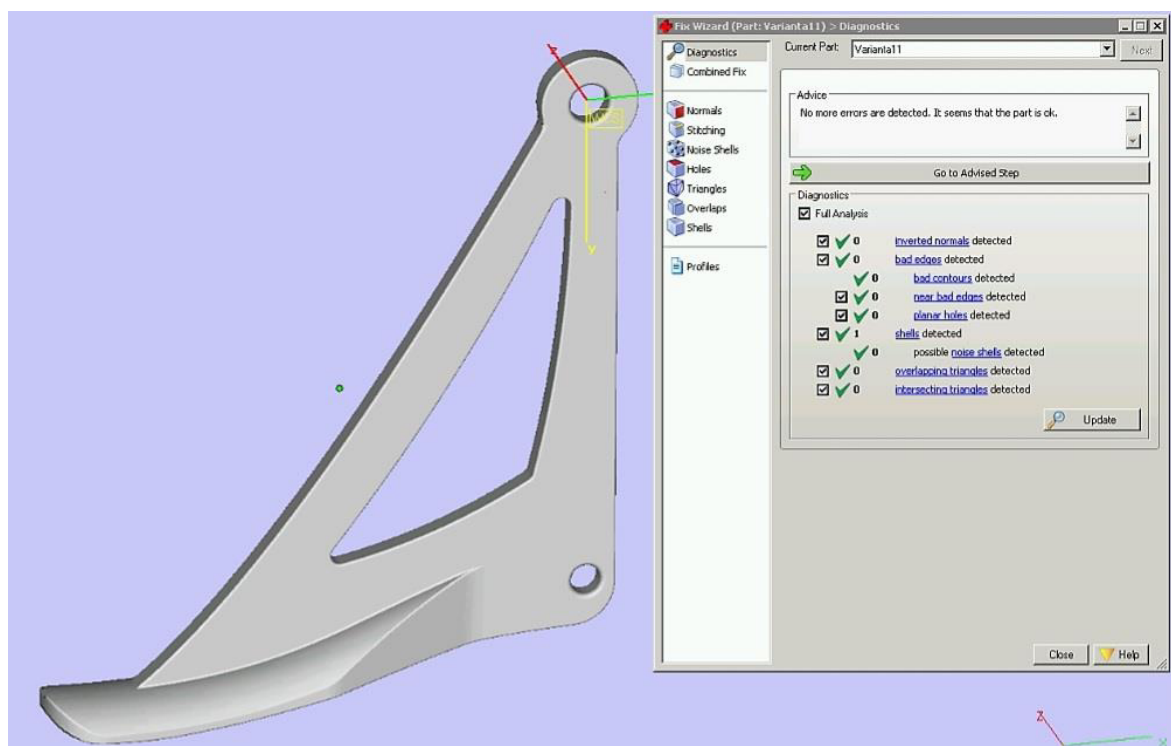
Soubor vytvořený v programu Inventoru byl exportován do formátu stl. Součást je rozdělena na mrak bodů, který je dále převeden na trojúhelníkovou síť polygonů a následně vyhlazen. Soubor jsme si načetli do programu Magics16. Surface accuracy byl nastaven na 0,005. Jedná se o přesnost síťování povrchu.

Program Magics udělal diagnostiku a detekoval několik problémů. Například převrácené normály byly způsobeny kreslením součásti pomocí metody zrcadlení.



Obr 4.1 Diagnostika v programu Magics16

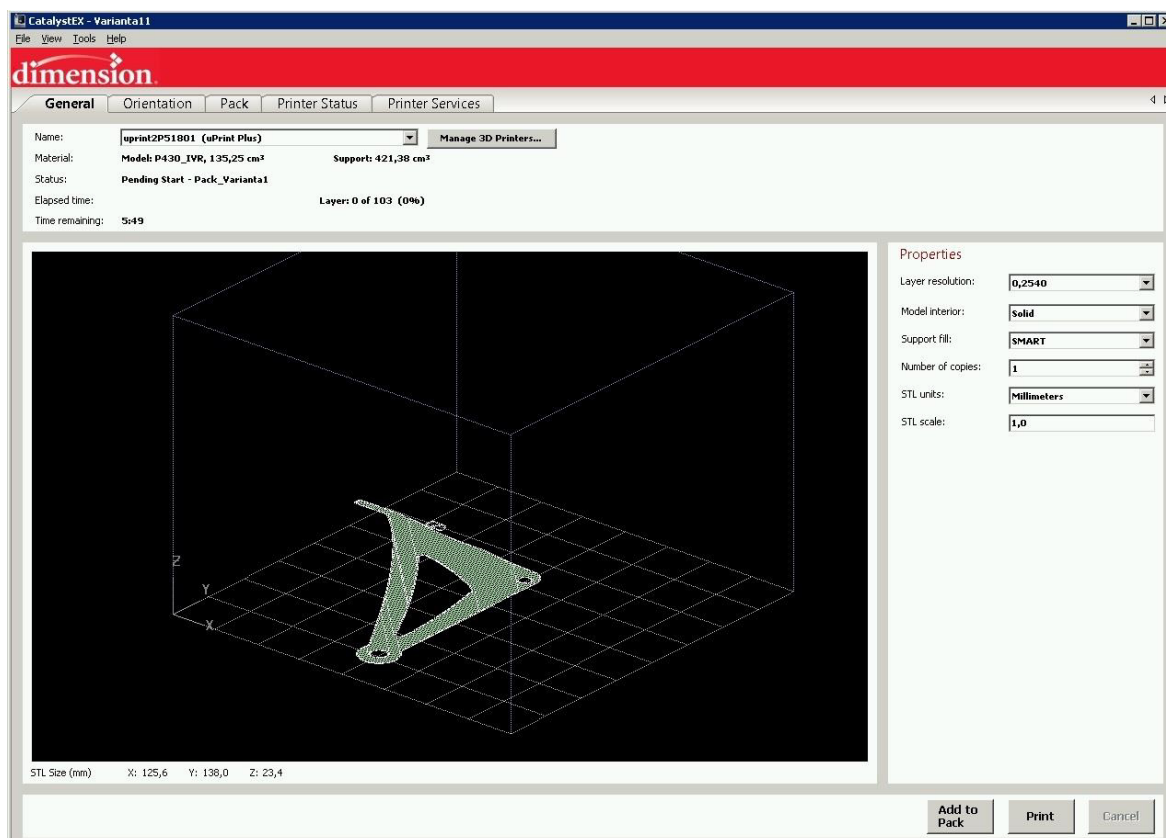
Dále probíhalo opravení těchto problémů, aby se nám součást vytiskla tak, jak potřebujeme. Na následujícím obrázku můžeme vidět, že všechny problémy byly vyřešeny a můžeme postoupit k další fázi nastavení parametrů tisku v programu CatalystEX.



Obr 4.2 Korekce v programu Magics16

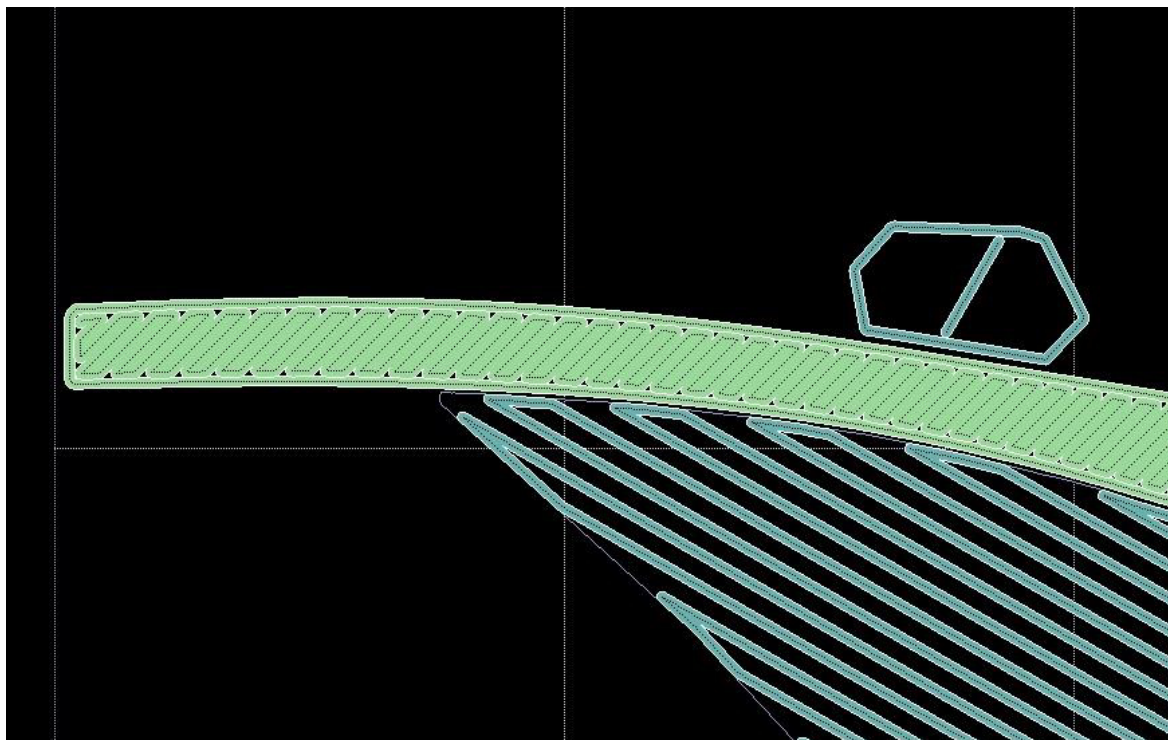
4.2 Program CatalystEX

V programu CatalystEX jsme nastavili vlastnosti pro 3D tisk. Tloušťka vrstvy-vlákna byla nastavena na 0,254 mm. Podpory si program navrhnul sám tak, aby to co nejlépe vyhovovalo 3D tisku díky funkci Support fill-SMART. Numbers of copies-počet kopií součásti, které se budou tisknout. Parametry STL units udávají v jakých jednotkách je součást navrhnutá a má se tisknout. Na výběr byly milimetry nebo palce. My jsme vybrali samozřejmě milimetry. Poslední věc, která byla potřeba nastavit, bylo měřítko. Pro tisk 1:1 bylo vybráno měřítko scale 1.



Obr 4.3 Nastavení vlastností v programu CatalystEX

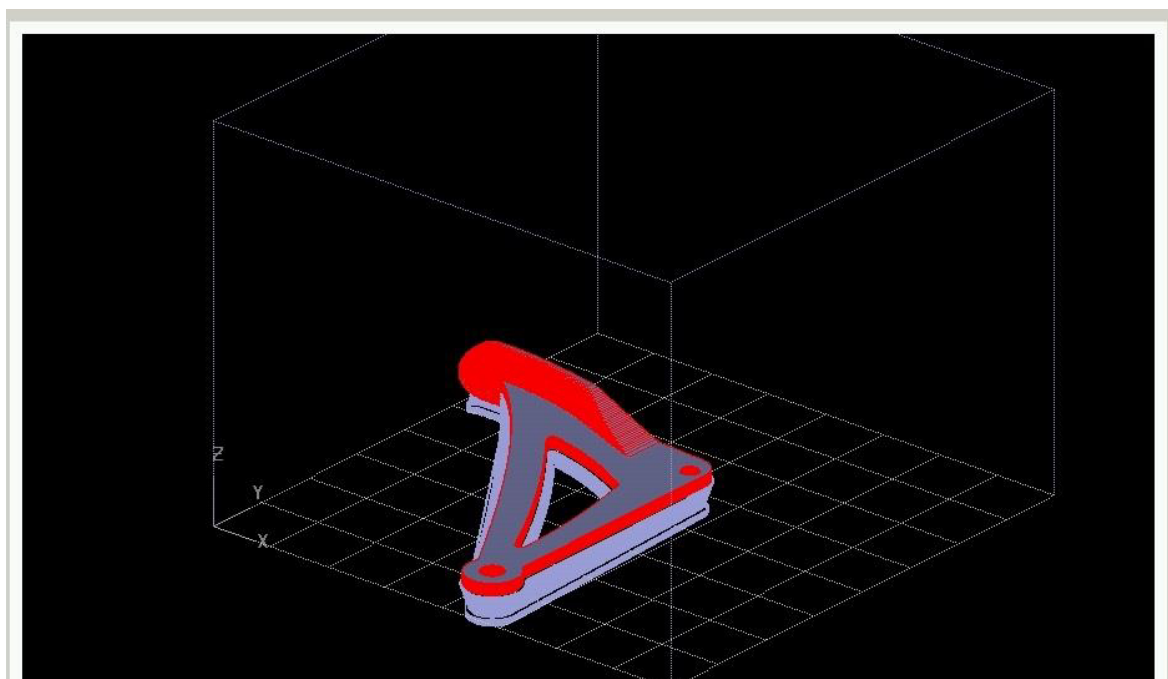
Na obr. 4.4 můžeme vidět progres součásti v určitém čase. Můžeme pozorovat, jak se bude postupně tvořit naše součást a také jak se bude tvořit podpora.



Obr 4.4 Průběh tvorby vláken v programu CatalystEX

Support (podpora)

Podpory si program vytvořil automaticky. Podpory jsou důležité pro tisk složitých geometrických tvarů. Kvůli brzdové „lžičce“ byla podpora vytvořena pod celou součástí. Druhá možnost, jak tisknout daný prototyp, by byla tisk na poloviny a pak slepit. Lepení materiálu ABS by nečinilo takový problém. Větší komplikace by byly s ostatními materiály jako třeba PLA. Navíc by mohly vzniknout problémy s narušením pevnosti součásti a nevyšlo by mi tolik součástí na podložku.



Obr 4.5 Tvorba podpory v programu CatalystEX

Dále bylo potřeba zvolit orientaci do souřadného systému a umístění součástí na podložku. Vše můžeme vidět na virtuální krychli v programu CatalystEX.

Všechny tři varianty se nám podařilo dostat na jednu podložku. Rozpoložení součástí je patrné na obr. 4.6. Součásti byly umístěny rovnoměrně od sebe, aby nedocházelo k ovlivňování se a k nepatřičným kolizím.



Obr 4.6 Rozmístění součástí na podložce

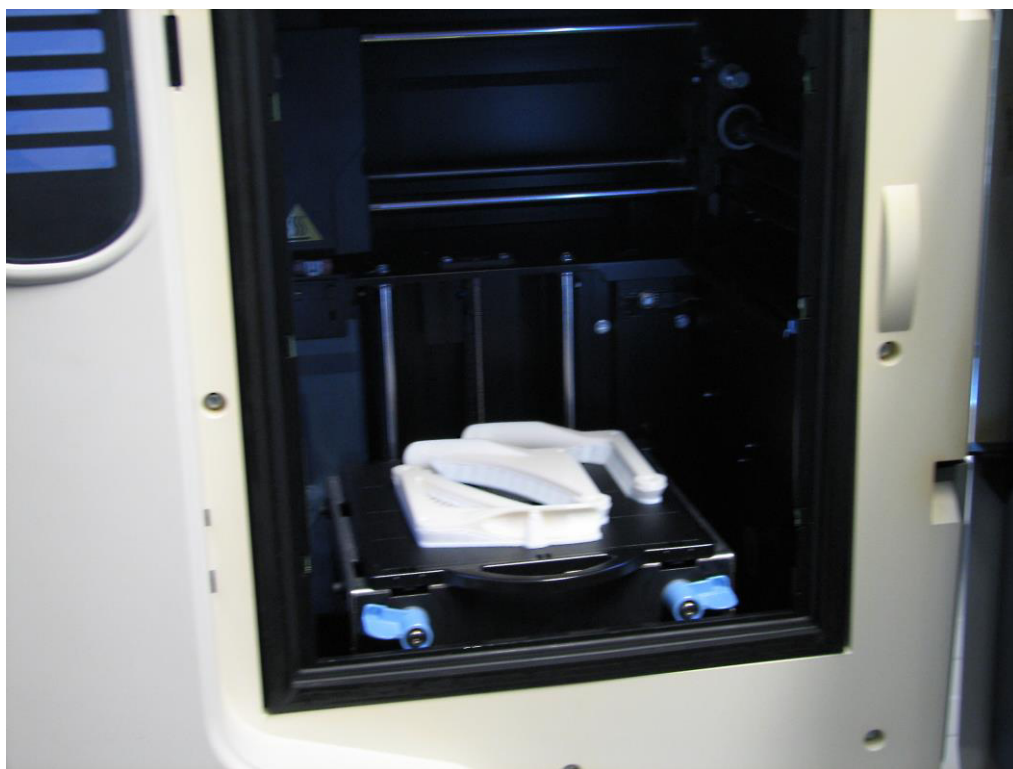
Materiál pro dané součásti byl vybrán ABS-M30. Na tisk všech variant bylo spotřebováno 85,38 cm³ materiálu ABS-M30. Na tvorbu podpor bylo spotřebováno 42,47 cm³ materiálu. Dále bylo vybráno, na které tiskárně se bude součást tisknout. Celkový čas tisku trval přibližně 6h.

4.3 Výroba metodou FDM

Po vhodném nastavení parametru tisku je vytvořený zdrojový kód, který je odeslán do 3D tiskárny a po nahřátí trysky a pracovní desky začal samotný proces tisku brzdých segmentů. Proces je samostatně řízený a automaticky ukončený po dokončení poslední vrstvy tisku. Všechny součásti byly ustaveny a tisknuty na jedné desce na tiskárně uPrint Plus ve firmě MCAE v Brně Kuřim.

Tiskárna umožňuje 3D tisk dílů na profesionální úrovni. Je vybavená osvědčenou technologií firmy Stratasys Fused Deposition Modeling (FDM), staví přesné a funkční koncepční modely, prototypy a díly z termoplastu ABSplus v barvě slonové kosti. Zásobník je rozdělen na dvě části (jedna pro podpůrný a druhá pro stavěcí materiál). Volitelně se dá pořídit a připojit druhý zásobník materiálu pro nepřetržitý provoz tisku. [6]

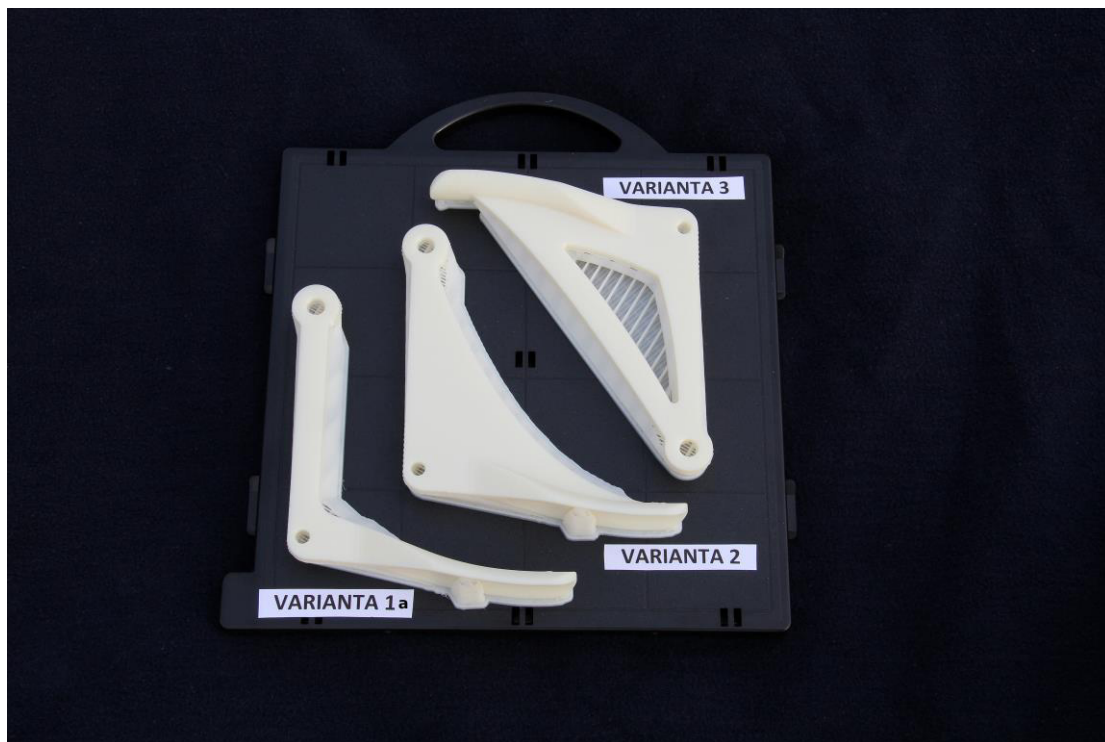
Proces tisku se obešel bez problémů.



Obr 4.7 Dokončení procesu tisku na tiskárně uPrint Plus

4.4 Post-procesing

Po dokončení tisku byly modely vyjmuty na pracovní desce z 3D FDM tiskárny. Dále následovalo odstranění z pracovní podložky, mechanické odstranění podpor, opracování a nástržik povrchu výrobku a nakonec samotná montáž na vysoké historické kolo.



Obr 4.8 Vytisknuté varianty s podporami na podložce

Odstranění podpor

Na odstranění podpor byl použit ořezávací nož. Po jejich odstranění byly na povrchu nerovnosti, které bylo nutno obrousit.



Obr 4.9 Odstraněné podpory na podložce

Povrchová úprava

Obrušování bylo prováděno smirkovými papíry a oboustrannými brusnými houbičkami různých drsností od P80 po P220. Po vybroušení do dostatečné kvality byly díly odmaštěny acetonem a následně nastříkány ve třech vrstvách chromovým sprejem značky Motyp.



Obr 4.10 Finální podoba brzdných segmentů

4.5 Montáž brzdných segmentů

Po dokončení lakování a zaschnutí byla součást pomocí šroubu úspěšně namontována na vysoké historické kolo v dílně pana Měsíčka a vyzkoušena v provozu. Všechny varianty splnily účel, přičemž nejlépe se jevily varianty 2 a 3.



Obr 4.11 Montáž varianty 1a



Obr 4.12 Montáž druhé varianty



Obr 4.13 Montáž třetí varianty

Dále mi bylo umožněno si brzdy vytisknout i z materiálů PC (bílá barva) a Nylon (černá barva), které mají mnohem lepší vlastnosti a vydržely by delší dobu, než by nastalo jejich opotřebení. Dokumentaci je možno sledovat na následujících obrázcích.



Obr 4.14 Varianty brzd z materiálu Nylon Obr 4.15 Varianty brzd z materiálu PC



Obr 4.16 Montáž varianty 2 z materiálu nylonu



Obr 4.17 Montáž varianty 1a z materiálu PC

5 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V technicko-ekonomickém zhodnocení byly vypočítány výrobní náklady na dané součásti pomocí obrábění, metodou FDM tisku a odléváním.

5.1 Současný stav výroby součásti obráběním

Brzdný segment se vyrábí ze dvou částí (lžičky a pásoviny), které se svaří dohromady a poté dále zpracovávají. Polotovar, z kterého se vyrábí lžička brzdného segmentu je možno vidět na obr. 5.1 Výchozím materiálem je kulatina o průměru 30 mm a délce 300 mm.



Obr. 5.1 Polotovar brzdy

Výroba lžičky se provádí obráběním. Rozříznutím takto obráběného polotovaru dojde k výrobě dvou lžiček. Pásovina se vyrábí frézováním ve čtyřech pracovních operacích. Svařením lžice a pásoviny vznikne hrubý polotovar brzdného segmentu, který se následně dále opracovává v těchto výrobních operacích – lisování, vrtání a zahlubování děr, broušení, smirkování a leštění.

Celý výrobní cyklus trvá celkem 142 min, přičemž nejdelší operací je vlastní leštění a smirkování, které trvá zhruba 90 min. Po dokonalém vyleštění povrchu brzdného segmentu je tento zaslán na konečnou povrchovou úpravu chromování.

Výsledná kalkulace tohoto dílu činí 850 Kč.

5.2 Výpočet nákladů pro metodu 3D FDM tisku

Náklady jsou počítány na stroj FORTUS 400 mc, který dokáže tisknout i z materiálů jako je Nylon a PC. Ceny těchto materiálů (vždy se jedná o kanystř s 1510 cm³ materiálu ve formě struny)

materiál ABS - M30: 362,-€

materiál PC: 406,-€

materiál NYLON: 406,-€

Tab. 5.1 Spotřeby materiálů a doby tisku

spotřeba									
	varianta 1a			varianta 2			varianta 3		
materiál	model	podpora	čas	model	podpora	čas	model	podpora	čas
	[cm ³]	[cm ³]	[hodin]	[cm ³]	[cm ³]	[hodin]	[cm ³]	[cm ³]	[hodin]
ABS-M30	21	8	1hod 4min	32	12	1hod 17min	33	14	1hod 22min
PC	22	11	1hod 7min	33	20	1hod 22min	35	22	1hod 28min
NYLON	22	13	1hod 43min	32	17	1hod 57min	34	18	2hod 4min

Pro materiál ABS –M30 platí, že při kurzu 1 €=27 Kč můžeme určit cenu kanystř materiálu.

$$C_K = 362 * 27 = 9\,774 \text{ Kč}$$

Náklady na 1 cm³ materiálu budou tedy

$$N_{MCK} = \frac{9\,774 \text{ Kč}}{1\,510 \text{ cm}^3} = 6,5 \text{ Kč.}$$

Na variantu 1a se spotřebovalo $S_1 = 29 \text{ cm}^3$, na variantu 2 bylo spotřebováno $S_2 = 44 \text{ cm}^3$ a nakonec na variantu 3 se spotřebovalo $S_3 = 47 \text{ cm}^3$.

Trhová cena jedné hodiny tisku se pohybuje okolo hodnoty 450 Kč. Náklady na hodinu tisku budou tedy $N_H = 450 \text{ Kč}$.

Varianta 1a se vytiskla za dobu $T_1 = 1 \text{ h } 4 \text{ min}$, varianta 2 se tiskla dlouho $T_2 = 1 \text{ h } 17 \text{ min}$ a varianta 3 trvalo vytisknout $T_3 = 1 \text{ h } 22 \text{ min}$.

Celkové náklady na 3D tisk se vypočítají jako součet nákladů na provoz tiskárny a nákladů na materiál. Výpočet aplikujeme na tisk varianty 1a.

$$N_C = N_P + N_M \quad (6.1)$$

Kde: N_Ccelkové náklady na tisk součásti [Kč],

N_Pnáklady na provoz tiskárny [Kč],

N_Mnáklady na materiál [Kč].

Náklady na provoz tiskárny:

$$N_P = T_1 * N_H \quad (6.2)$$

Kde: T_1celkový čas tisku varianty 1a [h],

N_Hnáklady na jednu hodinu tisku [Kč].

Náklady na materiál:

$$N_M = S_1 * N_{MCK} \quad (6.3)$$

Kde: S_1spotřeba materiálu na variantu 1a [cm³],

N_{MCK}náklady na jeden centimetr kubický materiálu [Kč].

Shrnutí položek pro variantu 1a:

$$T_1 = 1,07 \text{ h} \quad N_H = 450 \text{ Kč} \quad S_1 = 29 \text{ cm}^3 \quad N_{MCK} = 6,47 \text{ Kč}$$

Výpočet nákladů na provoz tisku:

$$N_P = T_1 * N_H = 1,07 * 450 = 481,5 \text{ Kč}$$

Výpočet nákladů na materiál:

$$N_M = S_1 * N_{MCK} = 29 * 6,5 = 188,5 \text{ Kč}$$

Výpočet celkových nákladů na 3D tiskárně:

$$N_C = N_P + N_M = 481,5 + 188,5 = 670 \text{ Kč}$$

Celková cena tisku varianty 1a vyšla 670 Kč. Nicméně tento výpočet není úplně přesný, protože jsme neuvažovali náklady na post-procesing. Do ceny také výrazně promlouvá stroj, na kterém by se tisklo.

Výše uvedený postup výpočtů by se dal aplikovat i na ostatní varianty, či jiné materiály jako jsou Nylon nebo PC.

5.3 Výroba součásti odléváním do silikonových forem

Master modely vyrobené metodou FDM jsou použity pro výrobu silikonové formy. Tato technologie je vhodná pro menší série odlitků, kdy časové zdržení a náklady na výrobu silikonové formy jsou vyváženy následnou rychlou produkcí tradičních voskových modelů. Silikon je velmi flexibilní materiál a výroba i negativních úkosů není žádný problém. [19]

Pro srovnání nákladů s cenou tisku jsem si nechal ve firmě MCAE udělat kalkulaci na výrobu součásti odléváním do silikonových forem.

Náklady na formu by stály 4 000 Kč a náklady na odlitek by činily 400 Kč. Průměrná životnost formy 25 odlitků a náklady na master model 1 000 Kč. Celkové náklady na první odlitek by činily 5 400 Kč. Materiál pro lití odlitku TORTEN PR403 nebo AXSON PX223.

5.4 Porovnání metod pro kusovou výrobu

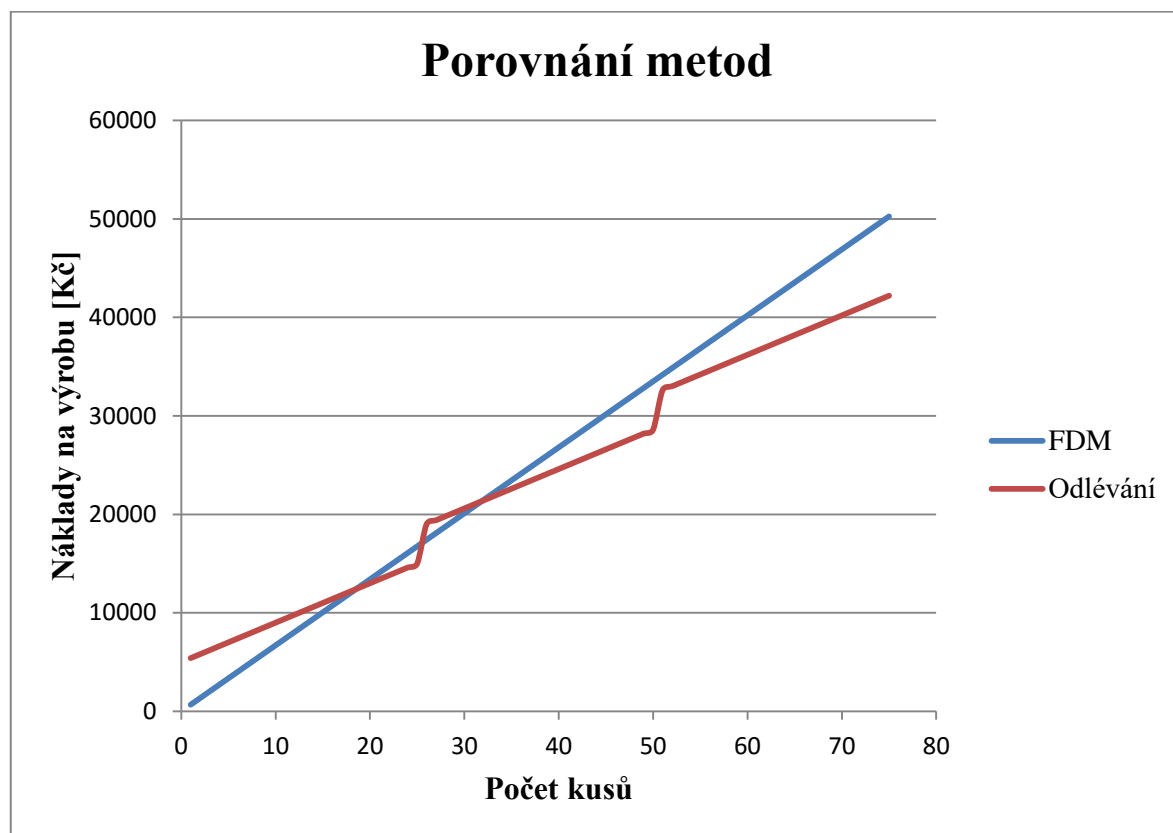
Do výrobních nákladů nebyly započítané některé úkony, jako jsou náklady na návrh modelu nebo náklady na post-processing. Tyto náklady jsou potřebné pro obě metody, a tudíž jsou pro srovnání efektivity výroby nepodstatné.

Náklady byly vypočítány v programu Microsoft Excel. Na výrobu prvního kusu pomocí odlévání byly započítány všechny náklady. Na další kusy byl vždy jen připočten náklad na jeden odlitek. Na výrobu 26. a 51. kusu byla připočtena suma na výrobu další formy.

Výpočet byl stanoven na 75 kusů. V tabulce 5.2 jsou vypočítány náklady na jednotlivý počet vybraných součástí a v grafu 5.1 je vykresleno srovnání daných metod.

Tab 5.2 Vypočítané náklady na výrobu varianty 1a

Náklady na výrobu [Kč]			Náklady na výrobu [Kč]			Náklady na výrobu [Kč]		
Počet kusů	FDM	Odlévání	Počet kusů	FDM	Odlévání	Počet kusů	FDM	Odlévání
1	670	5400	26	17420	19000	51	34170	32600
2	1340	5800	27	18090	19400	52	34840	33000
3	2010	6200	28	18760	19800	53	35510	33400
4	2680	6600	29	19430	20200	54	36180	33800
5	3350	7000	30	20100	20600	55	36850	34200
6	4020	7400	31	20770	21000	56	37520	34600
7	4690	7800	32	21440	21400	57	38190	35000
8	5360	8200	33	22110	21800	58	38860	35400
9	6030	8600	34	22780	22200	59	39530	35800
10	6700	9000	35	23450	22600	60	40200	36200
11	7370	9400	36	24120	23000	61	40870	36600
12	8040	9800	37	24790	23400	62	41540	37000
13	8710	10200	38	25460	23800	63	42210	37400
14	9380	10600	39	26130	24200	64	42880	37800
15	10050	11000	40	26800	24600	65	43550	38200
16	10720	11400	41	27470	25000	66	44220	38600
17	11390	11800	42	28140	25400	67	44890	39000
18	12060	12200	43	28810	25800	68	45560	39400
19	12730	12600	44	29480	26200	69	46230	39800
20	13400	13000	45	30150	26600	70	46900	40200
21	14070	13400	46	30820	27000	71	47570	40600
22	14740	13800	47	31490	27400	72	48240	41000
23	15410	14200	48	32160	27800	73	48910	41400
24	16080	14600	49	32830	28200	74	49580	41800
25	16750	15000	50	33500	28600	75	50250	42200

Graf 5.1 Grafické porovnání metody FDM a odlévání do silikonových forem

Z grafu je patrné, že metoda odlévání do silikonových forem je výhodnější pro sériovou výrobu. Začíná se nám vyplácet od výroby třicátého druhého kusu.

ZÁVĚR

Ve své bakalářské práci jsem se zabýval výrobou brzdného segmentu vysokého historického kola na 3D FDM tiskárně. Chtěl jsem poukázat na využití moderních technologií, které je možno uplatňovat při výrobě prototypů.

V první části mé práce je popsána technologie rapid prototyping, její historie, princip, možnosti a uplatnění. Zabýval jsem se detailně metodou FDM, která je jednou ze součástí této technologie. Dále jsem se věnoval různým materiálům vhodným pro tuto metodu tisku.

V další řešeršní kapitole jsem se věnoval historii vysokých historických kol u nás i ve světě a přistoupil jsem k samotnému řešení problematiky tisku brzdného segmentu.

Následující část práce je věnována návrhu různých variant brzdných segmentů. Vypočítal jsem si síly působící na brzdu a navrhl jsem další varianty, které splňují pevnostní kritéria.

Vybrané součásti byly poté exportovány do formátu stl a načteny do programu Magics16. V něm byly provedeny korekce a data převedena do programu CatalystEX. V programu se nastavily parametry tisku. Rozmístily se součásti na podložku a data byla poslána do 3D tiskárny.

Po ukončení tisku se provedlo odstranění podpor, obroušení součásti a nalakování. Varianty byly namontovány a odzkoušeny na historickém kole. Celý tento proces je zdokumentovaný.

V poslední kapitole jsem se věnoval zhodnocení z hlediska ekonomického. Je zde uveden stávající stav v kontrastu s metodou 3D tisku a odléváním do silikonových forem.

Závěrem je možno konstatovat, že metoda FDM je vhodná pro výrobu prototypů nebo různých tvarově složitých součástí. Prototyp je zhotoven velmi rychle, kvalitně a levně. Budoucnost této technologie je perspektivní zejména v tom, že vývoj jde neustále vpřed a také hledá možnosti náhrady klasických metod obrábění tiskem součástí z kovových materiálů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
2. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ Z. Nekonvenční metody obrábění 9. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 19.11.2008. [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-9-dil.html>
3. ŘASA, J., KEREČANINOVÁ Z. Nekonvenční metody obrábění 10. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 17.12.2008. [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-dil.html>
4. Fused Deposition Modeling. *3D-tisk* [online]. 2014. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/>
5. Rychlá výroba prototypů. *F1NEWS* [online]. Září 2013. [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://f1news.autoroad.cz/technika/45427-rychla-vyroba-prototypu-klic-k-intenzivnim-aerodynamickym-programum-v-f1-video>
6. UPrint SE Plus. *MCAE* [online]. 2016 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/novinka-uprint-se-3d-print-pack-1329746500-kopie-cz>
7. 3D tiskárny MakerBot. *Objet* [online]. 2015 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/3D-tiskarny/makerbot>
8. Rapid prototyping. *Evektor* [online]. 2015 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.evektor.cz/cz/rapid-prototyping>
9. Materiály pro 3D tisk. *FUTUR3D* [online]. 2014 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.futur3d.net/materialy-pro-3d-tisk>
10. FDM Thermoplastics. *Stratasys* [online]. 2016 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/materials/fdm>
11. FDM materiály. *Objet* [online]. 2015 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.objet.cz/materialy/fdm-materialy>
12. Historie a vývoj jízdního kola. *Velocipedy Telč* [online]. 2007 [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: <http://www.velocipedy-telc.cz/vyvoj/>
13. Bici d'Epoca e bici d'oggi. *I LIKE BIKE* [online]. 2008 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.ilikebike.org/2008/03/bici-depoca-e-bici-doggi/>
14. ADAMS, G. Donald. *Antique Bicycles*. 2nd ed. New York, 1996. ISBN 0-9649537-1-4.
15. GRIFFIN, Harry Hewitt. *Bicycles & Tricycles of the year 1886*. 1st ed. Yorkshire: Olicana Books, 1971.
16. Rodina Kohoutů a Strojnická dílna Jana Kohouta. *Sterba-bike* [online]. 2012 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.sterba-bike.cz/item/rodina-kohoutu-a-strojnicka-dilna-jana-kohouta>
17. Autodesk Inventor. *CADwiki* [online]. 2013 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.cadwiki.cz/Inventor.ashx?HL=inventor>
18. AutoCAD Inventor Professional. *Cadstudio* [online]. 2016 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.cadstudio.cz/invent>
19. Digitální dvojče Maserati. *Konstruktér*. 2016, (1), 52.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
3D	Trojrozměrný
CNC	Computer Numerical Control
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
RE	Reverse Engineering
STL	Vstupní formát dat 3D tiskárny
2D	Dvojrozměrný
SLA	Stereolithography
SGC	Solid Groung Curing
SLS	Selective Laser Sintering
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
LOM	Laminated Object Manufacturing
FDM	Fused Deposition Modeling
MJM	Multi Jet Modeling
PC	Polykarbonát
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
PLA	Polylaktid
MKP	Metoda konečných prvků

Symbol	Jednotka	Popis
C_K	[Kč]	Cena kanystru
N_{MCK}	[Kč]	Náklady na 1cm ³ materiálu
S₁	[cm ³]	Spotřeba materiálu na variantu 1a

S₂	[cm ³]	Spotřeba materiálu na variantu 2
S₃	[cm ³]	Spotřeba materiálu na variantu 3
T₁	[h]	Celkový čas tisku varianty 1a
T₂	[h]	Celkový čas tisku varianty 2
T₃	[h]	Celkový čas tisku varianty 3
N_H	[Kč]	Náklady na hodinu tisku
N_C	[Kč]	Celkové náklady na tisk součástí
N_P	[Kč]	Náklady na provoz
N_M	[Kč]	Náklady na materiál